

**MODELACIÓN Y SIMULACIÓN EN CFD DEL FLUJO MULTIFASE (LÍQUIDO-  
SÓLIDO-GAS) EN UN FOTOBIORREACTOR TIPO AIRLIFT PARA EL CULTIVO  
DE MICROALGAS**

FERNANDO CALVO SILVA

**UNIVERSIDAD DEL NORTE  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BARRANQUILLA  
2015**

**MODELACIÓN Y SIMULACIÓN EN CFD DEL FLUJO MULTIFASE (LÍQUIDO-  
SÓLIDO-GAS) EN UN FOTOBIORREACTOR TIPO AIRLIFT PARA EL CULTIVO  
DE MICROALGAS**

Tesis de grado para optar al Título de Magíster en Ingeniería Mecánica

FERNANDO CALVO SILVA

DIRECTOR

ANTONIO BULA SILVERA, PhD.

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD DEL NORTE**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍAS**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**BARRANQUILLA**

**2015**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

---

Barranquilla, noviembre 17 de 2015

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera aprovechar este espacio para agradecer a todas aquellas personas que de una u otra manera han contribuido para la consecución del presente trabajo, en especial al ingeniero Antonio Bula, director de esta investigación, por su orientación y por la confianza brindada en mí para este proyecto.

A mis padres y mi hermana quienes desde un principio han apoyado mi idea de continuar mis estudios a nivel de posgrado.

Quisiera extender mi gratitud a todos mis compañeros y amigos del departamento, quienes me han acompañado con su apoyo y sobre todo con su amistad durante mi estancia en la Universidad del Norte. Arnold Martínez, Hermes Ramírez, Iván Gómez, Jesús García, Iván Portnoy, Jean Pierre Coll, Adriana Rincón, Michael Miranda, Jhonnys Bustillo, Javier Jiménez, Kevin Meléndez, Luz Marlen, Arnaldo Verdeza, a todos ustedes gracias por su amistad.

Fernando Calvo

## **DEDICATORIA**

Este trabajo se encuentra dedicado a todos mis familiares, en especial a mis padres y mi hermana por su comprensión y constante apoyo en este proceso.

Una dedicatoria especial a todas mis amistades, quienes han hecho este camino más tranquilo y ameno.

Fernando Calvo

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
<b>1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>14</b>
<b>1.2. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>15</b>
<b>1.3. ANTECEDENTES</b>	<b>16</b>
<b>1.4. OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
<b>1.4.1. Objetivo general</b>	<b>17</b>
<b>1.4.2. Objetivos específicos</b>	<b>17</b>
<b>1.5. METODOLOGÍA</b>	<b>18</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>20</b>
<b>2.1. Flujo Multifáse</b>	<b>20</b>
<b>2.2. Coeficiente global de transferencia de masa (<math>K_L\alpha</math>)</b>	<b>20</b>
<b>2.3. Tiempo de mezclado</b>	<b>20</b>
<b>2.4. Velocidad de burbujas</b>	<b>20</b>
<b>2.5. Velocidad del líquido</b>	<b>21</b>
<b>2.6. Velocidad de sólidos</b>	<b>21</b>
<b>2.7. Eddy (Torbellino)</b>	<b>21</b>
<b>3. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>22</b>
<b>3.1. MICROALGAS Y SUS APLICACIONES</b>	<b>22</b>
<b>3.2. CULTIVO DE MICROALGAS</b>	<b>23</b>
<b>3.2.1. Sistemas abiertos</b>	<b>24</b>
<b>3.2.2. Sistemas cerrados</b>	<b>24</b>
<b>3.2.2.1. Fotobiorreactores de placa plana</b>	<b>26</b>
<b>3.2.2.2. Fotobiorreactores tubulares</b>	<b>26</b>
<b>3.2.2.3. Fotobiorreactores de columna vertical</b>	<b>27</b>

3.2.2.3.1.	Fotobiorreactores de columna de burbuja .....	28
3.2.2.3.2.	Fotobiorreactores tipo airlift.....	28
3.3.	MODELACIÓN CFD PARA FOTOBIORREACTORES TIPO AIRLIFT .....	30
3.3.1.	Simulación CFD de fotobiorreactores de columna de burbuja .....	31
3.3.2.	Simulación CFD de fotobiorreactores tipo airlift.....	33
3.3.3.	Simulación CFD de fotobiorreactores de placas plana .....	35
4.	MODELACIÓN MATEMÁTICA .....	36
4.1.	MODELACIÓN DE LAS ESPECIES .....	36
4.1.1.	Enfoque Euleriano.....	36
4.1.2.	Enfoque Lagrangiano .....	37
4.2.	SUPUESTOS DEL MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO .....	38
4.3.	ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE MASA Y CANTIDAD DE MOVIMIENTO .....	38
4.3.1.	Ecuación de conservación de masa.....	38
4.3.2.	Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento .....	39
4.3.2.1.	Fuerza de arrastre.....	40
4.3.2.2.	Fuerzas transversales .....	41
4.3.2.3.	Fuerza de masa virtual .....	41
4.3.2.4.	Fuerza de dispersión turbulenta.....	41
4.4.	MODELO DE TURBULENCIA PARA EL FLUJO MULTIFASE .....	43
5.	SOLUCION COMPUTACIONAL .....	45
5.1.	DOMINIO COMPUTACIONAL .....	45
5.1.1.	Generación de la malla volumétrica .....	46
5.1.1.1.	Selección de los modelos de mallado.....	47
5.1.1.2.	Tamaño base para el mallado .....	48

<b>5.2. CONVERSION DE LA MALLA VOLUMETRICA A 2D .....</b>	<b>49</b>
<b>5.3. CONFIGURACION DE LOS MODELOS FISICOS .....</b>	<b>50</b>
<b>5.3.1. Características físicas de cada una de las fases .....</b>	<b>51</b>
<b>5.3.2. Configuración de las interacciones entre las fases .....</b>	<b>52</b>
<b>5.3.3. Condiciones iniciales.....</b>	<b>53</b>
<b>5.3.4. Condiciones de frontera .....</b>	<b>53</b>
<b>5.4. INDEPENDENCIA DEL MALLADO .....</b>	<b>54</b>
<b>5.5. CONFIGURACIÓN PARA LA SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO</b>	<b>59</b>
<b>6. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>64</b>
<b>6.1. PERFIL DE VELOCIDAD Y FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DEL AIRE.....</b>	<b>64</b>
<b>6.2. PERFIL DE VELOCIDAD PARA EL AGUA.....</b>	<b>65</b>
<b>6.3. PERFIL DE VELOCIDAD Y FRACCIÓN VOLUMETRICA PARA LAS MICROALGAS.....</b>	<b>67</b>
<b>6.4. VECTORES DE VELOCIDAD PARA EL AGUA, LAS BURBUJAS Y MICROALGAS.....</b>	<b>68</b>
<b>6.5. ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA Y TASA DE DISIPACIÓN TURBULENTA EN LA FASE CONTINUA.....</b>	<b>71</b>
<b>7. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL .....</b>	<b>73</b>
<b>8. CONCLUSIONES.....</b>	<b>76</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Procesos de conversión de la biomasa producida a partir de microalgas. .....	23
Figura 2. Sistema abierto para el cultivo de microalgas. Lagoon, Western Australia. Tomado de [27] .....	24
Figura 3. Sistemas de cultivo de microalgas. ....	25
Figura 4. Fotobiorreactor de placa plana. Tomado de [7].....	26
Figura 5. Fotobiorreactor tubular. Tomado de [32] .....	27
Figura 6. Esquema de operación del fotobiorreactor tipo columna airlift. ....	29
Figura 7. Fotobiorreactor vacío (izquierda) y su respectivo CAD generado (derecha). .....	46
Figura 8. Malla volumétrica generada a partir del CAD del PBR. Vista lateral. ....	49
Figura 9. Malla 2D (figura a la izquierda) generada a partir del plano seccionado del fotobiorreactor (figura a la derecha). ....	50
Figura 10. Comportamiento de la velocidad del agua en un paso de tiempo durante las 500 iteraciones. ....	60
Figura 11. Comportamiento de la velocidad del aire en un paso de tiempo durante las 500 iteraciones. ....	61
Figura 12. Comportamiento de la velocidad de las microalgas en un paso de tiempo durante las 500 iteraciones. ....	61
Figura 13. Comportamiento de la fracción volumétrica del aire en un paso de tiempo durante las 500 iteraciones. ....	62
Figura 14. Comportamiento de la fracción volumétrica de las microalgas en un paso de tiempo durante las 500 iteraciones.....	63
Figura 15. Comportamiento de los residuales en la simulación. ....	63
Figura 16. Contornos de fracción volumétrica de aire. ....	64
Figura 17. Contornos de velocidad para la fase gaseosa. ....	65
Figura 18. Contornos de velocidad para la fase líquida. ....	66
Figura 19. Contornos de fracción volumétrica (izquierda) y velocidad (derecha) para las microalgas. ....	67

Figura 20. Vectores de velocidad para el aire. ....	68
Figura 21. Vectores de velocidad para la fase líquida. ....	69
Figura 22. Vectores de velocidad para el agua en el fondo del PBR. ....	70
Figura 23. Vectores de velocidad descritos por las microalgas. ....	70
Figura 24. Gráficos de contorno para la energía cinética turbulenta y tasa de disipación turbulenta en el PBR. ....	71
Figura 25. Distribución de la energía cinética turbulenta en la presente investigación (arriba), García et al. [62] (esquina inferior izquierda) y Oey et al [74]. (esquina inferior derecha). ....	72
Figura 26. Resultados para el PBR experimental y la simulación CFD a $t=1$ seg. ....	75
Figura 27. Resultados para el PBR experimental y la simulación CFD a $t=7$ seg. ....	75

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los diferentes sistemas de cultivo de microalgas. Adaptado de [39].	30
Tabla 2. Listado de simulaciones de fotobiorreactores haciendo uso de softwares CFD. Adaptado de [7].	43
Tabla 3. Constantes utilizadas para el modelo k- $\epsilon$	44
Tabla 4. Valores finales de la malla volumétrica.	48
Tabla 5. Resumen de algunos parámetros de la malla volumétrica.	48
Tabla 6. Propiedades físicas de las fases.	52
Tabla 7. Resumen de las especificaciones utilizadas para cada fase en las condiciones de frontera del PBR.	54
Tabla 8. Resumen del número de nodos y caras para cada una de las mallas utilizadas.	55
Tabla 9. Comportamiento de algunas variables del sistema con respecto a la resolución de mallado en el centro del PBR.	56
Tabla 10. Comportamiento del promedio en todo el dominio de algunas variables del sistema con respecto a la resolución de mallado.	56

# 1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de alternativas para los combustibles fósiles, ha promovido la investigación para el desarrollo de fuentes renovables de energías como la solar, la eólica o a partir de la biomasa. En este sentido, la producción de biocombustibles a partir del cultivo de microalgas apunta a ser la opción más viable para satisfacer la demanda de combustible en el futuro, obteniendo cada vez más importancia como fuente alternativa para satisfacer las necesidades energéticas gracias a su eficiencia de combustión con bajas emisiones [1]. Las microalgas son una prometedora materia prima para la producción de biodiesel, debido a su capacidad de crecer en ambientes adversos [2]. Algunos de estos microorganismos son capaces de acumular hasta entre un cincuenta y setenta por ciento en base seca de lípidos [2], siempre y cuando se mantengan las condiciones más favorables para este proceso. De acuerdo con [3], la cantidad de lípidos contenida por las microalgas es una medida del rendimiento energético que puede ser alcanzado por la biomasa, convirtiéndose de esta manera en el factor con mayor impacto sobre la economía del proceso global de producción de biodiesel a partir de estos microorganismos.

Para el cultivo de las microalgas se tienen dos tipos de diseño, los sistemas abiertos y los sistemas cerrados. En los primeros, el cultivo se encuentra expuesto al ambiente, mientras que en el segundo tipo el cultivo experimenta poco o ningún contacto con el ambiente externo [4] [5]. Estos últimos sistemas se denominan fotobiorreactores. Dada las ventajas para el control de las condiciones de operación para el cultivo, los fotobiorreactores ofrecen ventajas en este sentido con respecto a los sistemas abiertos [6].

En el estudio de los fenómenos que se presentan en los fotobiorreactores en el cultivo de las microalgas, ha cobrado gran importancia la aplicación de herramientas computacionales para el modelado y comprensión de la dinámica de fluidos, al permitir predecir los parámetros que caractericen el fenómeno objeto de estudio a través de la simulación de los distintos modelos matemáticos y correlaciones requeridas. Programas como Star-CCM+, Fluent, CFX, CVD entre otros, permiten

realizar dichas simulaciones para sistemas multifásicos. Estos softwares se basan en la generación de códigos de Dinámica Computacional de Flujo o CFD (Computational Fluid Dynamics) por sus siglas en inglés.

Las simulaciones desarrolladas en los distintos programas computacionales mencionados, alcanzan sus resultados a través de la solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes para volúmenes finitos [7], por lo que su procedimiento es de carácter iterativo. Esta herramienta puede utilizarse para estudiar y optimizar factores en los PBRs que influyen en la hidrodinámica del flujo, como velocidad superficial del gas, fracción volumétrica de gas, diámetro de burbuja, geometría de la columna y presión, para reducir la demanda de energía o para identificar zonas de mal mezclado o altos esfuerzos cortantes [8].

Debido a la importancia que cobra el uso de las herramientas CFD en el estudio de fotobiorreactores, esta investigación plantea como objetivo el desarrollo de la simulación del flujo en tres fases (agua-burbujas-microalgas) en un fotobiorreactor tipo *airlift*. A través de esta simulación se logrará analizar las distintas variables hidrodinámicas del sistema y determinar si las condiciones actuales de operación permiten un mezclado y recirculación adecuados que permitan una exposición homogénea de las microalgas a la luz.

## **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La capacidad de los fotobiorreactores para el cultivo de microalgas, convierte este tipo específico de tecnología en una fuente potencial de energía alternativa. La aplicación del cultivo de microalgas para la captación de CO<sub>2</sub> y para el tratamiento de aguas residuales, podría reducir de manera significativa la crisis energética causada por la disminución de los combustibles fósiles, así como las emisiones de gases de efecto invernadero [2] [9].

Por esta razón, es de gran importancia el lograr entender de manera adecuada los fenómenos que se presentan durante la operación de estos equipos. En este sentido, el uso de herramientas CFD ha cobrado gran importancia y su aplicación en estudios para la modelación de los fotobiorreactores ha venido en crecimiento durante los últimos años [7].

La presente investigación busca realizar la modelación y simulación del flujo multifásico (agua-burbujas-microalgas) en un fotobiorreactor tipo airlift. Se pretende entender cómo la presencia de las microalgas influye en la manera en que se presenta el flujo en estos dispositivos, los cuales se encuentran ampliamente aceptados como instrumentos para el cultivo de los mencionados microorganismos, dada sus comprobadas ventajas por su uso en este proceso.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

La modelación en CFD de fotobiorreactores tipo *airlift*, es un punto de partida para la optimización de las condiciones de mezclado que lleven a obtener una recirculación adecuada y exposición homogénea de las microalgas a la luz en estos dispositivos, esto gracias a que dichas modelaciones permiten obtener la caracterización del comportamiento hidrodinámico dentro de la columna.

El uso de herramientas CFD para la modelación hidrodinámica en este tipo de procesos cobra una gran importancia a la hora de predecir el comportamiento del flujo multifásico en fotobiorreactores tipo *airlift* y las variables asociadas a este. La implementación de estudios de este tipo permite analizar el efecto de factores como la geometría del equipo, la concentración de microorganismos en el sistema, la velocidad de suministro de aire entre otros, lo que podría llegar a reemplazar, en alguna medida, los ensayos experimentales.

De acuerdo con esto, se pretende modelar y simular por medio de CFD un flujo de tres fases gas-líquido-microalgas en un fotobiorreactor tipo columna *airlift* y a su vez realizar la validación experimental de las principales variables hidrodinámicas, por medio de una técnica de rastreo de partículas.

### **1.3. ANTECEDENTES**

El uso de herramientas CFD para el desarrollo de investigaciones en distintos campos de aplicación en la Universidad del Norte se ha realizado a través del grupo de investigación UREMA (Uso Racional de la Energía y Preservación del Medio Ambiente). El listado presentado a continuación, presenta un resumen de algunos de los trabajos desarrollados por este grupo en los últimos 5 años:

- Jean Pierre Coll, 2015. Modelaje por medio de un software de dinámica de fluidos del comportamiento hidrodinámico de un skimmer tank de una planta de tratamiento de agua.
- Julio Medina Suarez, 2012. Simulation and validation of Brazed-Plate Fin Heat Exchangers thermo- hydraulic performance.
- Samira García Freites, 2012. CFD modeling and simulation of multiphase flow in an air-lift type photobioreactor for cultivation of microalgae.
- Guisselle Polo Argel. 2012. CFD simulation of the thermo-hydraulic performance of OSF (Off Set Fin).
- Argemiro Palencia Díaz. 2011. Experimental study of micro cooling via radial submerged jet with induced draft.
- Roberto Junior Algarín Roncallo. 2010. CFD modeling of 2D impact with symmetric entry for design applications in planing boats.
- Cesar Luis Barraza Botet. 2010. Modeling and numerical solution of coal - natural gas co- combustion in a rotary kiln.



## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

- Modelar y simular en CFD el flujo multifásico agua-burbujas-microalgas dentro de un fotobiorreactor tipo columna *airlift*.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Estudiar y analizar variables hidrodinámicas críticas que afectan el proceso de mezclado y recirculación del flujo multifásico dentro de un fotobiorreactor tipo *airlift*.
- Definir el modelo matemático que permita modelar un régimen de flujo multifásico, considerando los fenómenos hidrodinámicos existentes.
- Definir el modelo matemático que permita modelar el proceso de movimiento de microalgas en fotobiorreactores tipo *airlift*.
- Simular el modelo hidrodinámico utilizando un software comercial CFD en un fotobiorreactor tipo columna *airlift*.
- Realizar una validación experimental de las principales variables hidrodinámicas involucradas en el modelo por medio de una técnica de rastreo de las trayectorias de flujo descritas por un trazador dentro del fotobiorreactor tipo *airlift* en funcionamiento.

## 1.5.METODOLOGÍA

La presente investigación fue llevada a cabo siguiendo la metodología presentada a continuación.

### ➤ **Revisión bibliográfica**

En la primera etapa de la presente investigación se realizó la recopilación, análisis y revisión de la información sobre el cultivo de microalgas en fotobiorreactores, así como sobre la hidrodinámica de flujo con múltiples componentes. Este proceso se llevó a cabo haciendo uso de revistas científicas especializadas en el tema, libros, bases de datos entre otros medios, alcanzando como resultado de esto, el desarrollo del estado del arte de esta investigación.

### ➤ **Modelo matemático que describe el flujo multifásico líquido-gas-sólido (microalgas)**

Se definió un modelo matemático que permite describir el flujo de tres componentes existentes en el fotobiorreactor, agua, aire en forma de burbujas y las microalgas, en fases continua para el líquido y dispersa para las dos fases restantes. Este modelo incluye las ecuaciones de Navier-Stokes, la turbulencia presente en el sistema así como las distintas interacciones entre las fases para la transferencia de cantidad de movimiento.

### ➤ **Simulación en CFD del flujo multifásico (agua-aire-microalgas) en una columna airlift**

El modelo matemático definido en la etapa previa, es utilizado para desarrollar la simulación del proceso haciendo uso del software STAR CCM+®. Por otra parte, se utilizó como base para configurar la geometría en la simulación las dimensiones presentadas en el proyecto Joven Investigador del estudiante de maestría Oscar Pupo, el cual está disponible en el Laboratorio de Biotecnología de la Universidad del Norte, Barranquilla - Colombia. Para dicho propósito se

utilizaron los planos de detalles en los que se especifican las dimensiones, para la generación del modelo CAD.

➤ **Validación experimental por medio de una técnica de rastreo de las trayectorias de flujo descritas por un trazador**

Se realizó la validación experimental de la velocidad del agua por medio de una técnica empírica de rastreo de las líneas de flujo expuestas por un trazador, que permita comprobar los resultados obtenidos a partir de la simulación numérica. Para estas pruebas y mediciones, se utilizó el fotobiorreactor tipo *airlift* disponible en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Universidad del Norte, Barranquilla - Colombia, suministrando agua al equipo, aire inyectado comprimido, y pequeñas partículas sólidas que recirculan en el sistema.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Flujo Multifáse**

Como definición general, el flujo multifáse consiste en el paso simultáneo en un sistema de una corriente compuesta por dos o más fases [10]. La característica más importante de un flujo multifáse es la existencia de una interface que separe las fases y las discontinuidades asociadas de las propiedades a través de la interfaz de las fases [11].

### **2.2. Coeficiente global de transferencia de masa ( $K_L\alpha$ )**

Es el parámetro más utilizado para evaluar el desempeño de los fotobiorreactores y es más comúnmente usado para describir el coeficiente global volumétrico de transferencia de masa en los fotobiorreactores. Este coeficiente es a su vez dependiente de otros factores como la tasa de agitación, el tipo de aspensor, de agentes surfactantes/anti-espumas y de la temperatura [6].

### **2.3. Tiempo de mezclado**

El tiempo de mezclado puede definirse como el tiempo necesario para alcanzar una mezcla homogénea después de la inyección de una solución trazadora. Este tiempo puede ser medido por medio de sustancias trazadoras como tintes, o por el método de señal-respuesta (*Signal-Response Method*) usando trazadoras y electrodos de pH [6].

### **2.4. Velocidad de burbujas**

Es una medida de la velocidad del flujo en el cultivo en fotobiorreactores tubulares, ya que los cultivos de algas circulan junto con burbujas de gas. La velocidad de burbujas de gas y el tamaño de las burbujas dependen de la tasa del flujo de líquido. Al incrementarse la tasa de flujo de gas, se aumenta el diámetro de las burbujas, lo cual consecuentemente podría incrementar la velocidad de burbujas de gas. La tasa de circulación del gas podría ser interrumpida cuando los deflectores o los mezcladores estáticos se instalan dentro del reactor para aumentar la dispersión del gas. Sin embargo, los elementos de mezclado ayudarían a romper las burbujas más

grandes en unas más pequeñas, esto aumentaría el área de contacto entre el líquido y el gas, mejorando la transferencia de masa en el cultivo [6].

### **2.5. Velocidad del líquido**

Es una medida del caudal de líquido y del grado de turbulencia en los fotobiorreactores. Cierta grado de turbulencia es requerido para asegurar que todas las células estén frecuentemente expuestas a la luz [6].

### **2.6. Velocidad de sólidos**

Es un indicador de cómo las células de las algas pueden ser transportadas uniformemente a lo largo del tubo mientras que los cultivos son aireados. Se reportó que el tipo (forma, tamaño y porosidad) y la cantidad de sólidos tienen una influencia en la transferencia de masa de los biorreactores. En cultivos de alta densidad de microalgas, las células pueden agruparse para formar unas especies de aglomeraciones dentro de los fotobiorreactores [6].

### **2.7. Eddy (Torbellino)**

Regiones donde el flujo se encuentra típicamente rotando y por ende tienen vorticidad, comportándose como pequeños remolinos [12].

### **3. ESTADO DEL ARTE**

#### **3.1. MICROALGAS Y SUS APLICACIONES**

Las microalgas son organismos acuáticos unicelulares de tamaño micrométrico que exhiben un metabolismo fotosintético, presentando estructuras menos complejas que las plantas terrestres [13]. Estos microorganismos pueden ser encontrados en casi todos los lugares de la tierra, en cuerpos de agua dulce, en sistemas marinos y ambientes hipersalinos [14]. Las microalgas son capaces de realizar su propia reproducción a través del proceso de fotosíntesis, en el cual la energía luminosa es transformada en energía química.

Las microalgas actualmente tienen una gran variedad de aplicaciones en un amplio rango de procesos. Entre los principales usos podemos mencionar:

- Biorremediación de aguas residuales. Las microalgas hacen uso del nitrógeno y fósforo de los desechos presentes en el agua residual de procesos agrícolas, procesos industriales etc., para aprovecharlos como nutrientes [15] [16].
- Bioabsorción de metales pesados. El uso de las microalgas en estos procesos, tiene beneficios tales como su capacidad para una rápida captación de los metales, ahorro de energía y tiempo, su amabilidad con el medio ambiente entre otros [17].
- Captura de CO<sub>2</sub> por fijación biológica. El uso de microalgas para la captura del dióxido de carbono es una tecnología muy efectiva [18]. Esta es una alternativa ambientalmente sostenible y presenta la ventaja que no se requiere un posterior almacenamiento del CO<sub>2</sub> capturado [19].
- Producción de ácidos grasos poliinsaturados. Las microalgas son consideradas como fuentes valiosas para la producción de estos aceites y grasas, y se convierten en una alternativa frente a fuentes de origen animal y vegetal [20].

- Las microalgas también son productoras de importantes pigmentos celulares (carotenoides y clorofila), los cuales pueden ser usados en productos alimenticios, cosméticos y en la industria farmacéutica [21].
- Producción de biodiesel. Las microalgas presentan ciertas propiedades que las convierten en una fuente promisorio para la producción de biodiesel. Entre estas se pueden mencionar su tasa de crecimiento, su contenido de lípidos, el perfil de ácidos grasos y la facilidad para su cultivo [22].
- Generación de energía a partir de biomasa. Esto puede obtenerse a partir de procesos de conversión termoquímica o procesos de conversión bioquímica, como se presenta en la figura 1 [23].

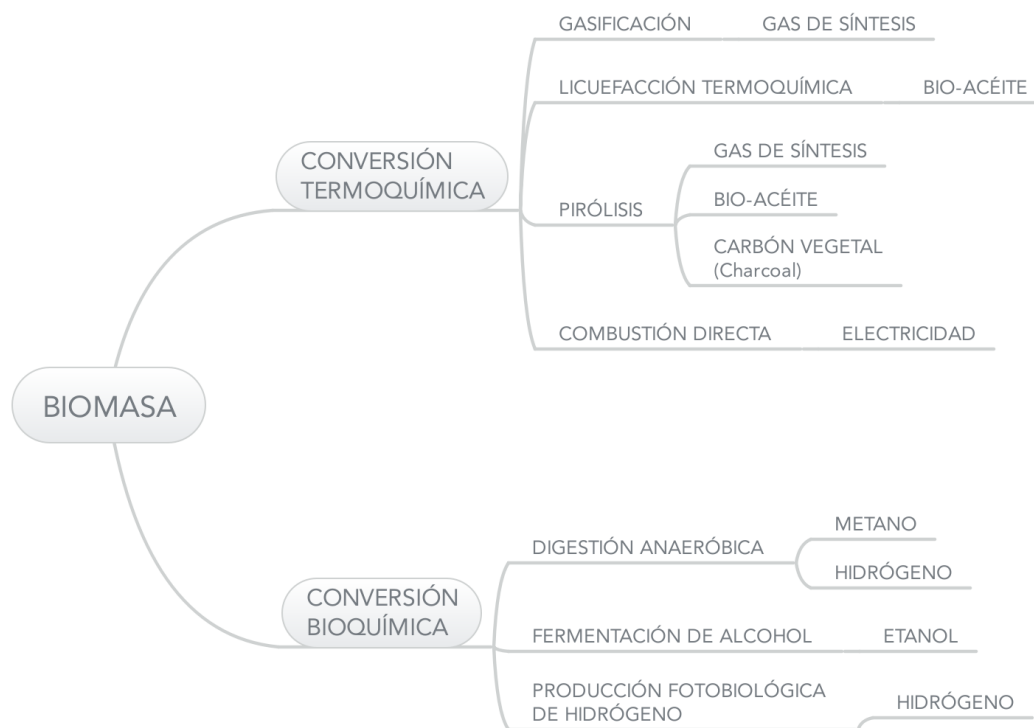


Figura 1. Procesos de conversión de la biomasa producida a partir de microalgas.

### 3.2. CULTIVO DE MICROALGAS

Las microalgas pueden ser cultivadas básicamente bajo dos diseños de producción, los sistemas abiertos y los sistemas cerrados [24].

### 3.2.1. Sistemas abiertos

Típicamente los sistemas abiertos para el cultivo de microalgas incluyen lagos y estanques naturales, así como estanques artificiales o contenedores. Estos sistemas son los más ampliamente usados para el cultivo de distintos tipos de microalgas, incluyendo la *Chlorella* [25]. La productividad de biomasa en estos cuerpos de agua suele ser baja, pero esto es compensado por los altos precios de los productos obtenidos y los bajos costos de operación y construcción [26].



Figura 2. Sistema abierto para el cultivo de microalgas. Lagoon, Western Australia. Tomado de [27]

### 3.2.2. Sistemas cerrados

Los sistemas cerrados son comúnmente denominados como fotobiorreactores (PBRs), en los cuales el cultivo contenido en el equipo permanece con poco o ningún contacto con la atmósfera [5] [28]. Los fotobiorreactores pueden ser definidos como sistemas cerrados donde microorganismos, como las microalgas, son capaces de llevar a cabo el proceso de fotosíntesis a partir de iluminación artificial, luz solar o una combinación de estas dos [29]. Generalmente los fotobiorreactores a escala de laboratorio son artificialmente iluminados usando lámparas



fluorescentes u otro tipo de distribuidores de luz. Los PBRs ofrecen ventajas sobre los sistemas abiertos para el cultivo de microalgas al presentar alta eficiencia y mayor producción de biomasa. Estos han sido usados satisfactoriamente en la producción de grandes cantidades de la mencionada biomasa a partir de las microalgas, como lo presenta la investigación de Carvalho et al [30].

Actualmente existen un gran número de diseños para fotobiorreactores, pero solamente algunos de estos son utilizados para el cultivo masivo de las microalgas. Entre estos diseños, encontramos los fotobiorreactores de placas planas (flat-plate), tubular horizontal/serpentín, fotobiorreactor tubular inclinado, de tanque de mezclado (stirred-tank), tubular helicoidal (helical/tubular), cónico (conical), toroide (torus) y de elevación neumática (airlift) (ver Figura 3).

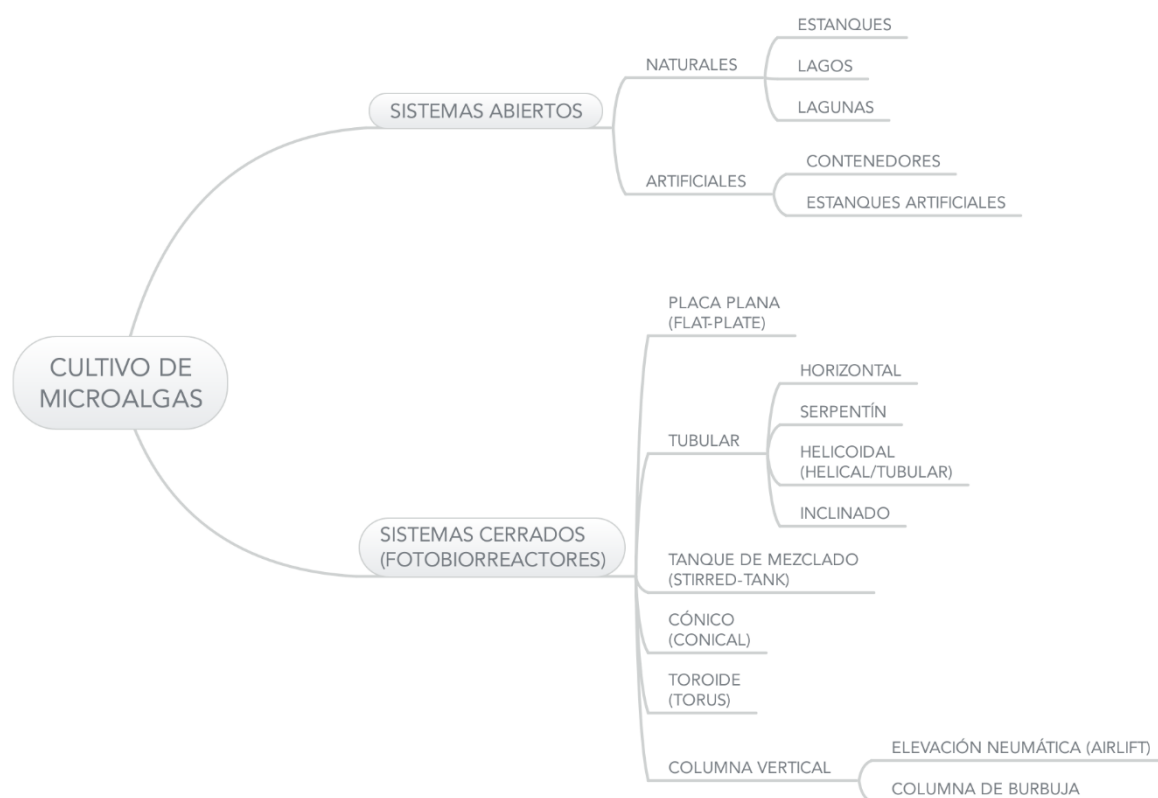


Figura 3. Sistemas de cultivo de microalgas.

### **3.2.2.1. Fotobiorreactores de placa plana**

Los fotobiorreactores de placa plana presentan una geometría rectangular y usualmente son fabricados con materiales transparentes para maximizar el aprovechamiento de la luz solar. Este tipo de fotobiorreactor presenta como su mayor ventaja una alta productividad y eficiencia al utilizar energía solar, debido a que ofrece una relación área-volumen bastante alta [30].

Otras ventajas que ofrecen son su relativo bajo costo, su facilidad para la limpieza y son adecuados para cultivos al aire libre. Entre sus principales limitaciones están la dificultad en el control de la temperatura, la escalabilidad requiere muchos compartimientos y materiales de soporte.



*Figura 4. Fotobiorreactor de placa plana. Tomado de [7]*

### **3.2.2.2. Fotobiorreactores tubulares**

Este tipo de sistema es uno de los más adecuados para cultivos externos ya que se caracterizan por tener gran área de exposición a luz solar. Son construidos usualmente de tubos de vidrio o plásticos. La aireación y el mezclado en los cultivos se realizan con bombas de aire y sistemas airlift. Análogamente muchos de estos sistemas requieren el uso de agitadores estáticos para proveer buenos niveles de mezcla en el medio y un óptimo aprovechamiento de la radiación solar [31].

La mayor limitación de este tipo de sistemas es su pobre transferencia de masa, se alcanzan altos niveles de oxígeno y  $\text{CO}_2$  disueltos, y es muy común la fotoinhibición. Las configuraciones tubulares más comunes son tipo serpentín, helicoidal y de tubos múltiples.



*Figura 5. Fotobiorreactor tubular. Tomado de [32]*

#### **3.2.2.3. Fotobiorreactores de columna vertical**

Los fotobiorreactores de columna de burbuja son compactos y tienen un costo relativamente bajo. Entre sus ventajas se encuentra la alta transferencia de masa que se puede alcanzar, un buen mezclado con esfuerzos cortantes bajos, bajo consumo energético, alto potencial de escalabilidad y fáciles de esterilizar [33] [34] [35]. Por otra parte, entre sus limitantes está la poca área de iluminación, el requerimiento de materiales sofisticados para su construcción y el hecho de que, como su diámetro y altura no puede incrementarse demasiado, se requiere de un gran número de unidades para construir una planta comercial [36].

Basados en el modo en el que fluye el líquido, los fotobiorreactores de columna vertical pueden ser clasificados en reactores de columna de burbuja y reactores tipo

airlift [24]. Tanto los PBRs tipo columna de burbuja como los PBRs tipo airlift, son usados a nivel industrial debido a su simplicidad de construcción y operación.

#### **3.2.2.3.1. Fotobiorreactores de columna de burbuja**

En este tipo de fotobiorreactor, se ubica un aspersor en la parte inferior del equipo con una serie de agujeros para garantizar un tamaño de burbuja deseado, y de esta manera lograr el mezclado debido a la acción del aire inyectado.

Entre sus ventajas se tiene que estos presentan costos relativamente bajos, un ambiente relativamente homogéneo para el cultivo y transferencia de masa y calor satisfactoria [24]. Por otra parte, cuando la velocidad de flujo está por debajo de 60 m/s, no se presenta circulación del fluido debido a la ausencia de retro-mezclado [37].

#### **3.2.2.3.2. Fotobiorreactores tipo airlift**

Los PBRs tipo airlift, son una modificación de los PBRs de columna de burbuja. En estos, el volumen del fluido contenido dentro del equipo se divide en dos zonas interconectadas [36], una zona de ascenso (riser) y una zona de descenso (downcomer).

Esto se logra al incluir una cavidad concéntrica central. Las modificaciones a la columna de burbuja fueron propuestas para superar dos grandes limitaciones. La primera es la de alcanzar un completo retro-mezclado (back-mixing) en la fase líquida y la segunda son los altos valores que presenta la caída de presión [38].

En la Figura 6 se muestra un esquema en el que se visualiza la operación del fotobiorreactor de elevación neumática.

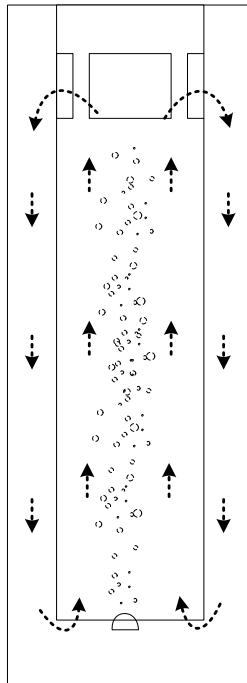


Figura 6. Esquema de operación del fotobiorreactor tipo columna airlift.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las principales ventajas y desventajas que los distintos sistemas de cultivo de microalgas ofrecen.

Sistemas de producción	Ventajas	Limitaciones
Sistemas abiertos	Relativamente económicos	Baja productividad de biomasa
	Fácil de limpiar	Grandes extensiones de tierra requerida
	Utilizan tierra no dedicada a la agricultura	Pobre mezclado y utilización de luz y CO <sub>2</sub>
	Bajo consumo energético	Limitado a unas pocas especies de microalgas
	De fácil mantenimiento	Los cultivos son fácilmente contaminados
Fotobiorreactor tubular	Gran área superficial de iluminación	Algún grado de crecimiento en las paredes
	Adecuado para cultivos en exteriores	Incrustación
	Relativamente económicos	Requiere grandes espacios para su instalación
	Buena productividad de biomasa	Gradientes de pH, oxígeno y CO <sub>2</sub> disuelto a lo largo de la tubería.

Sistemas de producción	Ventajas	Limitaciones
Fotobiorreactor de placa plana	Alta productividad de biomasa	Difíciles de escalar
	Fácil de esterilizar	Difícil control de temperatura
	Gran área superficial de iluminación	Algún grado de crecimiento en las paredes
	Adecuado para cultivos en exteriores	
Fotobiorreactores de columna	Son compactos	Áreas de iluminación pequeñas
	Alta transferencia de masa	De alto costo comparados con los sistemas abiertos
	Bajo consumo energético	Construcción sofisticada

*Tabla 1. Ventajas y desventajas de los diferentes sistemas de cultivo de microalgas. Adaptado de [39].*

### 3.3. MODELACIÓN CFD PARA FOTOBIORREACTORES TIPO AIRLIFT

Los fotobiorreactores son ampliamente utilizados para el cultivo de las microalgas [7], debido a que este tipo de tecnología contribuye a la reducción de los riesgos de contaminación para el cultivo, mejora las condiciones para poder replicar las condiciones de un cultivo específico, puede realizarse control sobre las variables hidrodinámicas y en la temperatura del sistema, y permite diseños técnicos apropiados [40].

En particular, los fotobiorreactores tipo airlift permiten obtener un rápido mezclado con producción de bajos valores de esfuerzo cortante, lo cual los hace adecuados para cultivar microalgas [41]. Los reactores de columna airlift son ampliamente usados en distintos campos industriales, en procesos químicos, petroquímicos y en bioprocesos, debido a su facilidad de construcción, su bajo costo de operación, la flexibilidad en el diseño, bajos requerimientos energéticos y su buena transferencia de masa y calor [38] [42].

Debido a todas las ventajas expuestas anteriormente para este tipo de fotobiorreactor, un gran número de investigaciones se han desarrollado durante las décadas pasadas. En este sentido, el entender el comportamiento hidrodinámico de

estos equipos se convierte en un asunto clave para mejorar su rendimiento al momento de cultivar las microalgas.

Tanto las investigaciones de carácter empírico como aquellas desarrolladas de manera computacional, contribuyen enormemente en este proceso. En los estudios que se llevan a cabo a través de simulaciones, las técnicas de dinámica de flujo computacional (CFD, por sus siglas en inglés), han estado a la vanguardia en el diseño de los fotobiorreactores donde las microalgas son cultivadas [7]. Esta herramienta hace uso de técnicas computacionales y numéricas para alcanzar la solución de sistemas que implican el movimiento de fluidos.

La dinámica de flujo computacional ha hecho un gran impacto en la caracterización de los campos de flujo en los fotobiorreactores, convirtiéndose en una poderosa herramienta para la predicción y posiblemente para la optimización de los diseños y de los requerimientos nutricionales y metabólicos de los microorganismos sin la necesidad de efectuar una gran cantidad de experimentos. Esto podría llevar a obtener ahorro tanto de recursos como de tiempo [43]. Aunque el enfoque CFD es ahora mucho más útil e interesante por beneficios anteriormente mencionados, estas simulaciones necesitan validarse antes de aplicarse, particularmente para aplicaciones multifase donde el fenómeno no se describe totalmente a partir de ecuaciones fundamentales de la física.

### **3.3.1. Simulación CFD de fotobiorreactores de columna de burbuja**

Numerosas investigaciones han sido desarrolladas durante la última década sobre fotobiorreactores de columna de burbuja. De acuerdo con Bitog et al. [7], esto se debe a que en la actualidad se han alcanzado grandes avances en las técnicas de medición aplicables a la hidrodinámica local para flujos dispersos de dos fases (líquida-gas) en columnas de burbuja, las cuales ofrecen medidas más confiables para determinar qué tan acertadas son las predicciones realizadas por las simulaciones CFD desarrolladas. Convirtiendo este tipo de reactor en un punto de referencia.

En el trabajo de Sanyal et al. [44], haciendo uso del software FLUENT, se ejecutó una simulación numérica bidimensional asimétrica de un reactor a escala de laboratorio, en el cuál se tiene flujo en estado transitorio, bajo condiciones de mezclado a través de burbujas de aire. Se realiza una comparación entre los resultados obtenidos al usar el modelo ASMM (Algebraic slip mixture model) [45] con los obtenidos con el modelo Euleriano para múltiples fases. Estos resultados fueron validados al tomar datos desde un reactor tipo columna vertical con las dimensiones del simulado, obteniendo resultados cuantitativos razonables para los perfiles de fracción volumétrica del gas y de velocidad axial para el líquido.

La influencia de la velocidad superficial del gas, la carga de sólidos y la geometría del aspersor (sparger) sobre las velocidades del flujo de líquido y sobre el perfil del hold-up, fue estudiada por Michele et al. [46]. La simulación fue realizada haciendo uso del código CFX-4.3 implementando el modelo de turbulencia  $k-\epsilon$ . Por otra parte, a través de este mismo modelo de turbulencia, se logró describir los patrones de flujo en un reactor de columna de burbuja para modelos de una, dos y tres dimensiones [47]. Los tres modelos presentan buenas predicciones para la velocidad axial del líquido y para los perfiles de hold-up del gas, pero sólo el modelo 3D presenta buena aproximación para difusividad turbulenta al comparar estos resultados con los datos experimentales.

Gimbun [48] presenta una simulación CFD para una columna de burbuja con flujo gas-líquido. En esta, se estudia la influencia de parámetros como el tamaño de burbuja, diferentes modelos de turbulencia así como el tamaño del mallado, sobre el gas hold-up y la velocidad axial del líquido. La simulación fue desarrollada en el software FLUENT, utilizando los modelos de turbulencia “mixture  $k-\epsilon$ ”, “dispersed  $k-\epsilon$ ” y “two-phase  $k-\epsilon$ ”, que se encuentran disponibles en el software. Los autores afirman que la precisión de los resultados de la simulación puede ser influenciada en gran medida por el tamaño de las burbujas, la resolución del mallado y el modelo de turbulencia seleccionado. Se concluye que al trabajar en sistemas con alta carga de gas (30% o más), el modelo “two-phase  $k-\epsilon$ ” es el más apropiado.



En el trabajo desarrollado por Mortuza et al. [49], se estudió la hidrodinámica de un flujo gas-líquido en PBR de columna rectangular usando experimentos, así como simulaciones CFD. En los resultados se encontró que el coeficiente de transferencia de masa volumétrica tiene una relación lineal con la velocidad superficial del gas. El coeficiente de arrastre promedio de las burbujas disminuyó y el número de Reynolds incrementó con el aumento de la velocidad superficial del gas. Los autores concluyeron que las burbujas más grandes tienen mayor velocidad y número de Reynolds que las burbujas pequeñas. Finalmente considerando estos factores, una velocidad superficial del gas óptima y un tamaño de burbuja óptimo pueden ser seleccionados para diseñar un PBR columna de burbuja.

### **3.3.2. Simulación CFD de fotobiorreactores tipo airlift**

En el estudio realizado por Mudde et al. [50], se presenta una simulación CFD en dos y tres dimensiones para un reactor tipo airlift con el modelo de turbulencia  $\kappa$ - $\epsilon$ . La simulación en 2D se desarrolla en un código desarrollado por los autores, mientras que la simulación en 3D fue llevada a cabo utilizando el programa FLUENT. La simulación fue realizada en estado estable y a bajas velocidades del gas. El estudio tiene como objetivo el comparar las simulaciones 2D y 3D entre sí, y además realizar esta comparación con un balance de energía unidimensional.

Bajo el mismo software (FLUENT), una simulación CFD fue desarrollada para un fotobiorreactor tipo airlift [51]. En esta, se tiene un sistema bifásico para un fotobiorreactor tipo Airlift de tubos concéntricos. El modelo para describir el régimen de flujo fue el ASMM. Al graficar el gas hold-up y la velocidad de la fase líquida contra la velocidad superficial del gas en la zona de ascenso (riser), se obtuvieron resultados con buena aproximación al compararse con los datos experimentales. Al comparar los datos para la zona de descenso (downcomer) obtenidos de manera experimental con aquellos arrojados por la simulación, se obtiene poca precisión y los perfiles obtenidos a partir de estos no siguen la tendencia de los datos reales. Esto puede ser atribuido a la ecuación para la fracción volumétrica, al tamaño escogido para las burbujas y la resolución de la malla usada.

Un sistema de tres fases es simulado en el trabajo presentado por Talvy et al. [52], para un reactor tipo airlift. En la simulación, se da solución a las ecuaciones de transferencia de masa y cantidad de movimiento para cada una de las fases. Con el modelo se realizan predicciones de las velocidades y fracción volumétrica de cada una de las fases. Al comparar los valores arrojados por la simulación con datos experimentales, se encuentra que parámetros como la fracción volumétrica del gas y del sólido son cercanos a los datos experimentales al mantener el hold-up del sólido hasta un valor del 40%; con valores superiores a este y con velocidades altas para la fase gaseosa, los datos predichos por el modelo se alejan de los experimentales.

Roy et al. [38], obtienen el patrón de flujo y el gas hold-up haciendo uso de una simulación CFD de un reactor airlift de lazo externo. Para esto se usó un modelo de dos fluidos (two fluid-model). Los resultados fueron validados posteriormente con datos experimentales encontrando una buena precisión de los datos arrojados por la simulación. Por otra parte los autores realizaron una comparación entre los datos para la velocidad de circulación del líquido obtenidos de manera experimental y los encontrados a partir de la simulación, a través de un amplio rango de parámetros como la velocidad superficial del gas, la razón de área de sección transversal del downcomer respecto al riser y el área de sección transversal del riser, encontrando una muy buena concordancia.

Haciendo uso del paquete computacional CFX 5.7 Luo et al. [53], desarrollan una simulación de un fotobiorreactor tipo airlift con tubo interno fue desarrollada. En este trabajo los autores realizan una evaluación de la fiabilidad del uso de simulaciones CFD para la predicción de las trayectorias descritas por los microorganismos en este tipo de PBR. Los resultados arrojados por la simulación son comparados con datos experimentales, encontrando una buena predicción de la recirculación de los microorganismos alrededor del tubo interno pero realiza predicciones sobreestimadas del tiempo de residencia de las células en la región de las paredes.

La simulación de una columna airlift con tubo interno y flujo bifásico es estudiada en [54]. La velocidad del líquido y el gas hold-up obtenidos a partir de datos experimentales, variando el diámetro del tubo interno y la velocidad del gas alimentado, fueron comparados con los resultados de la simulación CFD, la cual fue desarrollada en el software COMSOL Multiphysics 3.5a. En la simulación no se tiene en cuenta el efecto de la unión de las burbujas, sin embargo se obtienen resultados cercanos a los datos experimentales para baja alimentación volumétrica del gas.

### **3.3.3. Simulación CFD de fotobiorreactores de placas plana**

En el estudio presentado por Su et al. [55], se simularon nueve esquemas diferentes de un fotobiorreactor de placa plana en las que se incluía barras desestabilizadoras del flujo. De acuerdo con los resultados obtenidos, la presencia de este sistema de desestabilización ayuda a alcanzar un mezclado homogéneo. Al variar la configuración del equipo, el diámetro de la barra desestabilizadora y la velocidad de entrada del fluido, se logra establecer la mejor configuración para el sistema propuesto basándose en la velocidad en la dirección vertical. Esta simulación fue desarrollada en el programa FLUENT.

Por otra parte Wang et al. [56], estudiaron el efecto de incluir deflectores dentro de la estructura de un fotobiorreactor de placa plana a través de una simulación CFD en el software CFX 13.0, haciendo uso del modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  estándar para describir el comportamiento del flujo turbulento. Se optimizó la configuración del PBR con la inclusión de los deflectores, obteniéndose un incremento de 1.88 veces en la producción de biomasa al comparar esta con la obtenida con un fotobiorreactor convencional sin deflectores. La mejora del mezclado, debido a la presencia de deflectores, también es estudiada en el trabajo presentado por Huang et al. [57], en el que se compara un PBR convencional con otros tres PBRs con distintas configuraciones para los deflectores a través de simulaciones CFD. Se encontró que en los diseños propuestos, la tasa de crecimiento de las microalgas fue superior con las estructuras presentadas. La simulación fue desarrollada en CFX 12.1 con el modelo de turbulencia  $\kappa$ - $\epsilon$  estándar.

## 4. MODELACIÓN MATEMÁTICA

El software Star CCM+ ofrece al usuario diversos modelos para la simulación de un flujo con presencia de múltiples fases. Particularmente, el flujo inducido por burbujas en un fotobiorreactor tipo airlift puede ser simulado al utilizar el modelo multifásico.

### 4.1. MODELACIÓN DE LAS ESPECIES

El modelado matemático de sistemas multifásicos se encuentra generalmente basado en dos tipos de enfoques, el enfoque Euleriano y el enfoque Lagrangiano. Ambos enfoques mencionados se encuentran basados en las ecuaciones de Navier-Stokes. En la presente investigación se hace uso del enfoque Euleriano para la modelación y simulación de cada una de las especies presentes en el sistema objeto de estudio.

#### 4.1.1. Enfoque Euleriano

En el enfoque Euleriano, las propiedades del fluido son observadas desde una ubicación fija con respecto a un marco de referencia, el cual puede ser estacionario o moverse a una velocidad dada. En este enfoque las propiedades del fluido son dadas para una coordenada específica para un tiempo determinado. Por ejemplo, la velocidad puede expresarse como  $V = V(x, y, z, t)$ , donde las variables espaciales son independientes del tiempo [58].

El modelo multifásico Euleriano promedia las ecuaciones de Navier-Stokes sobre el volumen, incluyendo partículas arbitrarias más una fase continua. Se resuelven las ecuaciones de continuidad, masa y momentum para fases fluidas y sólidas, y se rastrea la fracción volumétrica.

El enfoque utiliza solo un campo de presión para todas las fases, luego el campo de presión es el mismo no importando si la fase es continua o dispersa. La interacción entre los flujos promedios se realiza por medio de términos de interacción, que incluye fuerza de arrastre, fuerza de sustentación, fuerza de dispersión turbulenta y efecto de masa virtual.

Esta aproximación es adecuada para modelar flujos multifásicos en los cuales flujos de gas-líquido [7].

#### **4.1.2. Enfoque Lagrangiano**

El enfoque lagrangiano requiere que las propiedades de un elemento en particular sean rastreadas a medida que avanza en el fluido. En este enfoque el fluido es visto como un conjunto de partículas donde la trayectoria de estas, se calculan como resultado de las fuerzas actuando sobre ellas. En un sistema multifásico, la fase estudiada bajo este enfoque es rastreada solucionando las ecuaciones de movimiento teniendo en cuenta un balance de las fuerzas principales, como presión, gravedad, fuerza de arrastre, fuerza de sustentación, y adicción de masa [53].

Además, la interacción entre las burbujas que llevan a la coalescencia y al rompimiento puede modelarse directamente. Esta interacción entre las burbujas y el líquido se considera en un término dentro de las ecuaciones de cantidad de movimiento [59].

Siendo la ubicación de la partícula de fluido una función de las coordenadas espaciales y función del tiempo, se puede realizar un seguimiento a un determinado elemento del fluido a partir de su ubicación inicial, y la velocidad a un tiempo dado para dicho elemento se puede expresar como  $V = V(x_o, y_o, z_o, t)$ .

Este tipo de enfoque es de difícil implementación para la descripción de fenómenos de gran complejidad, como es el flujo en estado transitorio considerando el análisis para tres dimensiones de acuerdo con lo mencionado en [58].

Este alcance es mucho más realista pero requiere de una alta demanda de memoria, velocidad y tiempo computacional, para lograr rastrear un número suficiente de partículas para una modelación precisa. También el costo de los recursos computacionales hace a este enfoque más costoso de emplear en

simulaciones CFD y su aplicación es limitada a PBRs con burbujas pequeñas de forma esférica en régimen homogéneo [7].

Por otra parte, diversos trabajos han sido desarrollados para la simulación de flujos con dos o más fases, haciendo necesario el modelado del fenómeno. En mucho de estos estudios se utiliza una combinación de los enfoques Euleriano y Lagrangiano para distintas fases [46] [60] [61]

#### **4.2. SUPUESTOS DEL MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO**

Alguno de los principales supuestos realizados para la modelación del flujo multifásico en el fotobiorreactor, son presentados a continuación:

- Todas las fases son tratadas como continuos interpenetrantes.
- Las fases gaseosa y líquida se tratan como incompresibles con un campo de presión uniforme:  $p = p_l = p_g$
- La fase gaseosa dispersa se asume como burbujas esféricas con tamaño uniforme.
- No se tiene en cuenta los fenómenos de coalescencia y ruptura de las burbujas.
- No se considera transferencia de masa entre las fases.
- El total del dominio del fluido es considerado bajo condiciones isotérmicas, por lo que la transferencia de calor no es tomada en cuenta.
- Las microalgas (fase dispersa sólida) son modeladas como partículas sólidas esféricas con un tamaño constante.

#### **4.3. ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE MASA Y CANTIDAD DE MOVIMIENTO**

##### **4.3.1. Ecuación de conservación de masa**

La ecuación de conservación de masa o ecuación de continuidad puede ser descrita como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \bar{u}_\alpha) = 0 \quad (1)$$

$$(\alpha = l, g, s)$$

En esta ecuación se debe cumplir como restricción, que la suma de las fracciones volumétricas para las tres fases deben ser igual a uno.

$$\sum r_\alpha = 1 \quad (2)$$

#### 4.3.2. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

Para la modelación de la conservación de la cantidad de movimiento puede ser descrita por la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha u_\alpha) + \nabla \cdot r_\alpha \rho_\alpha u_\alpha u_\alpha = -r_\alpha \nabla P + r_\alpha \rho_\alpha g + \nabla \cdot (r_\alpha \mu_{\alpha,eff} (\nabla u_\alpha + \nabla u_\alpha^T)) + M_{l,\alpha} \quad (3)$$

El término para la viscosidad efectiva ( $\mu_{\alpha,eff}$ ) incluye las contribuciones de la viscosidad molecular ( $\mu_\alpha$ ) y la viscosidad dinámica turbulenta ( $\mu_\alpha^T$ ) [62]. Para la fase líquida la viscosidad efectiva se define como:

$$\mu_{l,eff} = \mu_l + \mu_l^T + \mu_{g,l} + \mu_{s,l} \quad (4)$$

Para las fases dispersas se tiene:

$$\mu_{g,eff} = \mu_g + \mu_g^T \quad (5)$$

$$\mu_{s,eff} = \mu_s + \mu_s^T \quad (6)$$

La viscosidad turbulenta para la fase líquida es calculada de la siguiente manera:

$$\mu_l^T = \rho_l C_\mu \left( \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \quad (7)$$

$$\mu_{g,l} = \rho_l C_{\mu p} \varepsilon_g d_B |u_g - u_l| \quad (8)$$

En cuanto a las fases dispersas, la viscosidad turbulenta puede ser calculada como:

$$\mu_g^T = \frac{\rho_g}{\rho_l} \mu_{T,l} \quad (9)$$

$$\mu_s^T = \frac{\rho_s}{\rho_l} \mu_{T,l} \quad (10)$$

El término  $M_{I,\alpha}$  tiene en cuenta todas las fuerzas interfaciales que intervienen en la transferencia de cantidad de movimiento [53]. Entre estas podemos incluir la fuerza de arrastre ( $M_D$ ), fuerzas transversales ( $M_L$ ), fuerza de masa virtual ( $M_{VM}$ ) y la fuerza de disipación turbulenta ( $M_{TD}$ ).

$$M_I = M_D + M_L + M_{VM} + M_{TD} \quad (11)$$

Las fuerzas entre dos fases se consideran iguales pero con dirección opuesta [63]:

$$M_{I,lg} = -M_{I,gl} \quad (12)$$

$$M_{I,ls} = -M_{I,sl} \quad (13)$$

#### 4.3.2.1. Fuerza de arrastre

Para los propósitos de la presente investigación, se consideran fracciones volumétricas suficientemente bajas para las fases dispersas, lo que permite despreciar las interacciones entre las burbujas y entre las microalgas.

En el software STAR-CCM+ [64], la fuerza de arrastre puede ser expresado como:

$$M_{D,\alpha} = \frac{1}{2} C_D \rho A_p |v_s| v_s \quad (14)$$

En esta ecuación  $\rho$  hace referencia a la densidad de la fase continua,  $v_s$  es la diferencia entre la velocidad de la fase continua y la velocidad de las partículas,  $A_p$  es el área proyectada de la partícula en el plano perpendicular al flujo y  $C_D$  es el coeficiente de arrastre.



#### 4.3.2.2. Fuerzas transversales

Esta fuerza interfacial, hace referencia a la fuerza de sustentación que experimenta una partícula al estar en un flujo cortante, la cual tiende a desplazar dicha partícula en la dirección normal del flujo.

$$M_L = -C_L \rho_l r_\alpha (u_l - u_\alpha) \times \nabla \times u_l \quad (15)$$

El valor del coeficiente  $C_L$  toma un valor constante para partículas totalmente esféricas y que no presenten deformación. En caso de que el fenómeno de deformación deba tenerse en cuenta para la modelación, el coeficiente  $C_L$  debe ser calculado a partir de correlaciones, tales como la presentada por Tomiyama et al. [65].

#### 4.3.2.3. Fuerza de masa virtual

Este fenómeno modela la fuerza que es ejercida sobre una partícula mientras esta acelera la fase continua que la rodea [64]. Por la tercera ley de Newton, principio de acción y reacción, la aceleración del fluido generará una correspondiente fuerza transitoria que actúa sobre la partícula en la dirección opuesta de su aceleración.

Este es un tipo de fuerza no estacionaria conocida como fuerza de masa virtual o de masa añadida [66].

$$M_{VM} = -C_{VM} \rho_l r_\alpha \left( \frac{Du_l}{Dt} - \frac{Du_\alpha}{Dt} \right) \quad (16)$$

#### 4.3.2.4. Fuerza de dispersión turbulenta

La fuerza de dispersión turbulenta modela la interacción entre la fase dispersa y los eddies turbulentos de los alrededores [64]. Esto lleva a que se produzca una dispersión adicional de las fases desde las zonas de alta fracción volumétrica a las zonas de baja debido a las fluctuaciones turbulentas.

STAR CCM+ utiliza la siguiente ecuación para modelar esta fuerza:

$$M_{TD} = A_{l\alpha}^D v_{TD} \quad (17)$$

En esta ecuación el término  $A_{l\alpha}^D$  es el coeficiente de arrastre linealizado promedio, el cual es calculado a partir del área interfacial promedio  $a_{l\alpha}^m$  y la diferencia promedio entre la velocidad de la fase continua y de la fase dispersa  $v_s$ .

$$A_{l\alpha}^D = a_{l\alpha}^m \rho_l C_D |v_s| \quad (18)$$

El término  $v_{TD}$  es una velocidad de desplazamiento relativo debido a la utilización de definiciones ponderadas, basadas en las fracciones volumétricas, para la velocidad de fase.

$$v_{TD} = D_{l\alpha}^{TD} \left\{ \frac{\nabla r_d}{r_d} - \frac{\nabla r_l}{r_l} \right\} \quad (19)$$

El tensor de coeficiente de difusividad  $D_{l\alpha}^{TD}$  es usualmente aproximado isotrópicamente a través de la difusividad turbulenta de la fase continua [64]:

$$D_{l\alpha}^{TD} = \frac{\nu_l^t}{\sigma_\alpha} I \quad (20)$$

En esta ecuación  $\nu_l^t$  es la viscosidad cinemática turbulenta de la fase continua y  $\sigma_\alpha$  es el número de Prandtl turbulento para la fracción volumétrica (por defecto es considerado igual a 1).

La intensidad turbulenta ( $I$ ) por su parte, es una medida de la raíz media cuadrática de las fluctuaciones de la velocidad local  $u'$ , con respecto a la velocidad promedio o velocidad de referencia  $\bar{u}$ :

$$I = \frac{u'}{\bar{u}} \quad (21)$$

Si se utiliza un modelo de turbulencia basado en las ecuaciones promediadas de Reynolds, el término  $u'$  se calcula como [64]:

$$u' = \sqrt{\frac{2}{3}k} \quad (22)$$

Donde  $k$  es la energía cinética turbulenta.

#### 4.4. MODELO DE TURBULENCIA PARA EL FLUJO MULTIFASE

Para lograr dar solución a la turbulencia que se presenta dentro del dominio computacional del sistema a estudiar, el software STAR CCM+ ofrece al usuario 7 modelos de turbulencia distintos, los cuales se listan a continuación:

- Standard K-Epsilon
- Standard Two-Layer K-Epsilon
- Standard Low Reynold Number
- Realizable K-Epsilon
- Realizable Two-Layer K-Epsilon
- Abe-Kondoh-Nagano low Reynolds number
- V2F low-Reynolds number

De acuerdo con [7], el modelo de turbulencia  $k-\epsilon$  es el usado de manera más amplia al momento de realizar simulaciones de procesos multifásicos como se puede observar en la Tabla 2, donde se presentan diversas simulaciones CFD de fotobiorreactores (PBR). Esto se debe a la simplicidad del modelo y su capacidad para predecir flujos turbulentos delimitados por paredes [11].

Tipo de PBR	Modelo de turbulencia	Autor
Columna de burbuja	$k-\epsilon$	Seo et al. [67]
Placa plana	$k-\epsilon$	Su et al. [55]
Columna de burbuja	$k-\epsilon$	Gimbun [48]
Columna de burbuja	$k-\epsilon$	Simmonet et al. [68]
Columna de burbuja	RNG $k-\epsilon$	Trujillo et al. [69]
Columna de burbuja	Standard $k-\epsilon$	Akhatar et al. [70]
Columna de burbuja	Standard $k-\epsilon$	Ekambara et al. [47]

Tabla 2. Listado de simulaciones de fotobiorreactores haciendo uso de softwares CFD. Adaptado de [7]

En el presente estudio se hace uso del modelo  $k-\epsilon$  standard. Las ecuaciones utilizadas por el software STAR CCM+, son aquellas publicadas por Jones y Launder [71]. Las ecuaciones para la energía cinética turbulenta y la disipación turbulenta para describir el flujo multifásico son tomadas de [53].

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha K_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha K_\alpha u_\alpha) - \nabla \cdot \left( r_\alpha \left( \mu_\alpha + \frac{\mu_\alpha^T}{\sigma_k} \right) \nabla K_\alpha \right) = -r_\alpha (P_\alpha - \varepsilon_\alpha \rho_\alpha) + S_{\alpha,k} \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha \varepsilon_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha \varepsilon_\alpha u_\alpha) = \nabla \cdot \left( r_\alpha \left( \mu_\alpha + \frac{\mu_\alpha^T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon_\alpha \right) + r_\alpha \frac{\varepsilon_\alpha}{k_\alpha} (C_{\varepsilon 1} P_\alpha - C_{\varepsilon 2} P_\alpha \varepsilon_\alpha) + S_{\alpha,\varepsilon} \quad (24)$$

En estas ecuaciones el término de producción se define como:

$$P_\alpha = \mu_\alpha^T \nabla u \cdot (\nabla u + \nabla u^T) - \frac{\mu_\alpha^T}{\rho Pr_t} g \cdot \nabla \rho \quad (25)$$

Los términos  $S_{\alpha,k}$  y  $S_{\alpha,\varepsilon}$  son usados para modelar fenómenos adicionales tal como la dispersión turbulenta [62].

Las constantes utilizadas en el modelo de turbulencia seleccionado se presentan en la Tabla 3. Estos son los valores reportados en [64].

$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_\mu$	$C_{\mu p}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$Pr_t$
1.44	1.92	0.09	0.06	1.0	1.3	1.0

Tabla 3. Constantes utilizadas para el modelo  $k-\varepsilon$

Todas estas ecuaciones descritas son incluidas en el modelo matemático que el software STAR CCM+ utiliza para alcanzar los resultados de la simulación.

## **5. SOLUCION COMPUTACIONAL**

El modelo matemático anteriormente descrito es solucionado de manera computacional a través del software STAR CCM+ versión 9.06.009. Para alcanzar esta solución un conjunto de pasos consecutivos deben ser seguidos en el software.

Entre estos se encuentra la importación del modelo CAD elaborado en SolidWorks que represente de manera gráfica el fotobiorreactor tipo airlift a estudiar, editar y configurar el dominio computacional en la aplicación Star CCM+ en donde se definió el proceso de mallado para luego establecer las condiciones de frontera iniciales y configurar los parámetros de simulación.

### **5.1. DOMINIO COMPUTACIONAL**

En la Figura 7 se presenta el fotobiorreactor tipo columna airlift y el correspondiente modelo CAD generado para este. Las dimensiones del fotobiorreactor fueron tomadas del proyecto de Joven Investigador del Ing. Oscar Pupo Roncallo, en el cual se realizó el diseño y se logró la fabricación de este equipo.

El fotobiorreactor fue construido de acrílico con un espesor de 4 mm, una altura de 750 mm, con diámetro de 250 mm para la columna externa, 150 mm para el diámetro del tubo central y cuatro ventanas ubicadas cerca del tope del tubo central con el fin de permitir la recirculación del agua.

Durante la generación del CAD, una modificación fue realizada al PBR original. Debido a que el nivel del agua no alcanza la pared superior del fotobiorreactor, el tope del CAD fue ubicado cerca del centro de las ventanas de recirculación, que es la altura aproximada a la que se tiene el agua durante la operación del equipo. Por su parte, la entrada de aire es modelada como una semiesfera con un diámetro de 40 mm.



*Figura 7. Fotobiorreactor vacío (izquierda) y su respectivo CAD generado (derecha).*

#### **5.1.1. Generación de la malla volumétrica**

Una vez definido el dominio computacional sobre el cual se solucionará el modelo matemático, se procedió a generar la malla volumétrica, en donde se obtuvo una discretización espacial para luego resolver las ecuaciones del modelo.

El software STAR CCM+ utiliza el método de volúmenes finitos para discretizar la geometría del sistema a estudiar. En este método, el dominio computacional es subdividido en un número finito de pequeños volúmenes de control, correspondientes a las celdas de la malla generada [64]. Este método discretiza las ecuaciones en cada uno de los poliedros del dominio, en los que previamente se realiza una discretización espacial. La integral de superficie que aparece en el término de la derecha de la ecuación de Navier-Stokes completa (en su forma integral) es aproximada por la suma de los flujos que atraviesan cada una de las caras del poliedro [72]

Para este procedimiento se utilizó el modelo “*Trimmer*”, el cual usa predominantemente un mallado hexaédrico. Entre las ventajas que ofrece este

modelo, está el uso de menos memoria por celda que el requerido por las mallas poliédricas. Por otra parte, el modelo “*Prism layer mesher*” se utilizó para generar celdas prismáticas ortogonales a las paredes del sistema. Estas celdas son necesarias para mejorar la precisión de la solución [64].

La selección de cada uno de los modelos y los parámetros necesarios para la configuración de la malla computacional para el sistema, es realizada a través de una serie de pasos que son descritos a continuación.

#### **5.1.1.1. Selección de los modelos de mallado**

El software STAR CCM+ ofrece al usuario distintos modelos para la generación de la malla para dar solución al fenómeno a simular. Estos modelos son divididos en dos grupos: los modelos de mallado de superficie y los modelos de mallado volumétrico [64].

Se tienen disponibles dos modelos para crear el acabado superficial:

- Surface remesher
- Surface wrapper

Por otro lado para la generación de la malla volumétrica podemos mencionar los siguientes modelos que se encuentran disponibles:

- Prism Layer Mesher
- Polyhedral Mesher
- Tetrahedral Mesher
- Thin Mesher
- Trimmer
- Extruder

Cada uno de estos lleva a la construcción del acabado superficial y la malla volumétrica, basándose en distintas configuraciones geométricas.

Para el presente estudio, se escogió trabajar con los modelos Surface Remesher, para el acabado superficial, y los modelos Prism Layer Mesher y Trimmer para la malla volumétrica.

El modelo Surface Remesher realiza un remallado para la superficie del dominio, mientras que el modelo Prism Layer Mesher genera celdas prismáticas ortogonales al lado de las paredes superficiales o fronteras. Por otra parte, el modelo Trimmer usa predominantemente una malla hexaédrica para la malla volumétrica. La ventaja ofrecida por este modelo es el requerir menos cómputo por celdas que los modelos poliédricos [64].

#### 5.1.1.2. Tamaño base para el mallado

Una vez seleccionado los modelos para la generación de la malla, se procede a establecer el tamaño base de los elementos que la componen. Los resultados que se reportan en el presente documento corresponden a un tamaño base de  $4 \times 10^{-3}$  m. En la Tabla 4 se presentan los resultados finales para el proceso de mallado del dominio, y en la Tabla 5 se realiza un resumen de las características del mallado.

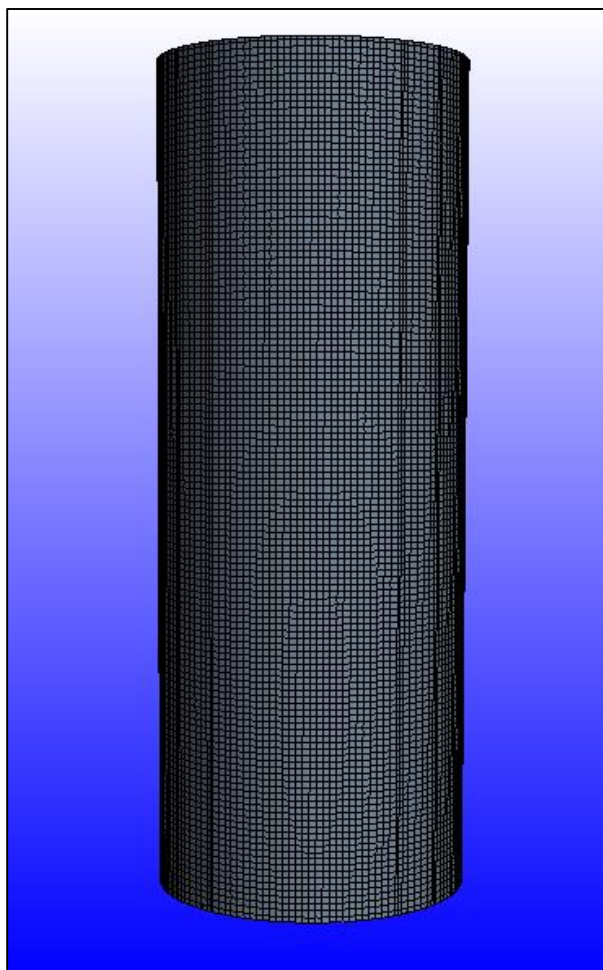
DOMINIO		VALOR
PBR 3D	Caras	1'622.198
	Nodos	606.294
PLACA 3D	Caras	875.256
	Nodos	534.029
PBR 2D	Caras	349.528
	Nodos	177.963

Tabla 4. Valores finales de la malla volumétrica.

Tamaño base	$4 \times 10^{-3}$ m
Tamaño máx de celda	0,4 m (por defecto)
Número de "prism layers"	5
Espesor de "prism layers"	33.3 % del tamaño base
Tasa de crecimiento	1.3 (por defecto)

Tabla 5. Resumen de algunos parámetros de la malla volumétrica.





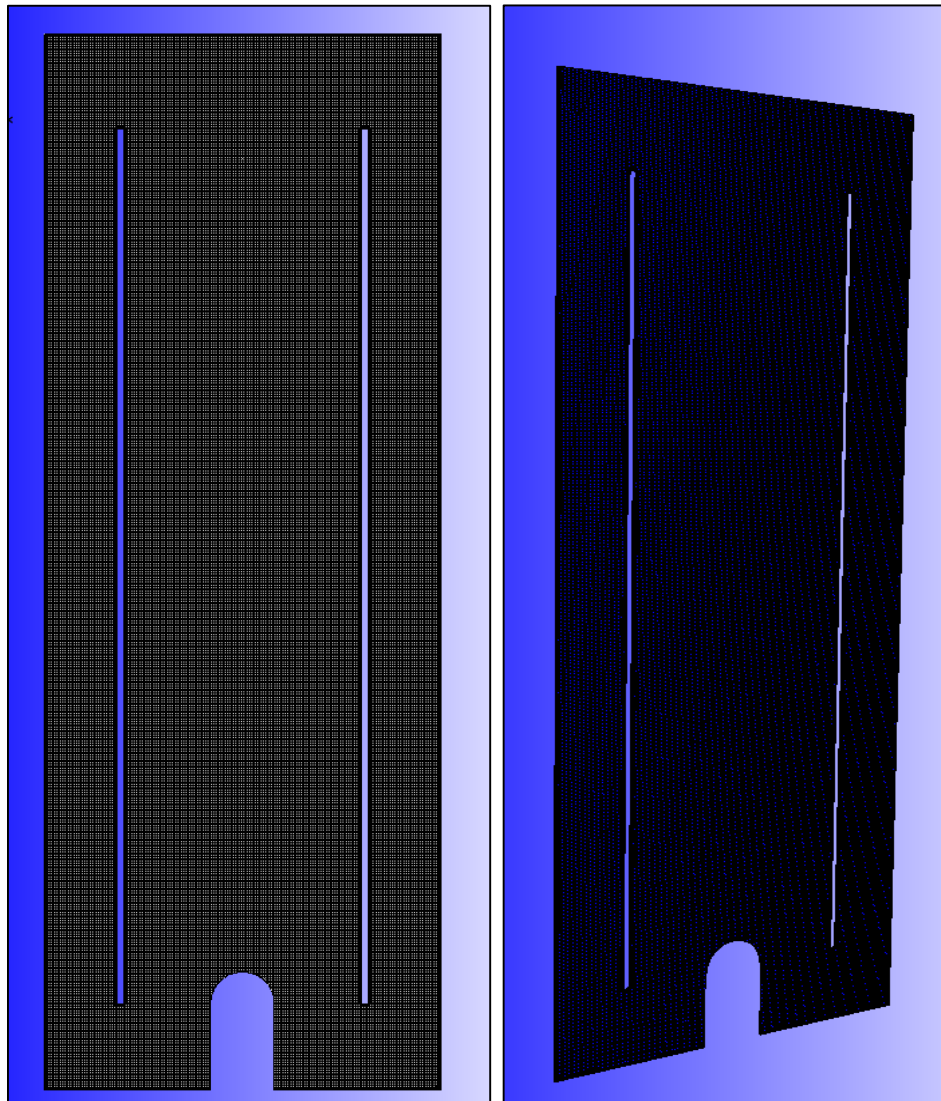
*Figura 8. Malla volumétrica generada a partir del CAD del PBR. Vista lateral.*

## **5.2. CONVERSION DE LA MALLA VOLUMETRICA A 2D**

Una vez generada la malla volumétrica en tres dimensiones, se procede a obtener una representación en dos dimensiones de esta misma. La principal razón por la cual esto es realizado, es el gran consumo computacional que requiere desarrollar la simulación con la malla 3D original.

Como primera medida para este proceso se establecieron las distintas condiciones de frontera del sistema, las cuales serán presentadas en detalle más adelante. Posteriormente se generó una sección equivalente a una placa de 1 mm de espesor sobre el eje central del fotobiorreactor en donde se da el flujo multifase (agua-burbujas-microalgas), para finalmente convertir el dominio 3D a un dominio 2D. En

la Figura 9 se presenta de manera gráfica la malla con la que se obtendrán los resultados de la simulación.



*Figura 9. Malla 2D (figura a la izquierda) generada a partir del plano seccionado del fotobiorreactor (figura a la derecha).*

### **5.3. CONFIGURACION DE LOS MODELOS FISICOS**

Como ya se ha mencionado, para la simulación se utiliza un enfoque Euleriano para cada una de las fases que hacen parte del sistema. El estudio se realiza en estado transitorio y con un dominio bidimensional.

Dado el hecho que se tiene distintas fases interactuando, se escoge el modelo de mezcla multifase, así como el modelo de flujo multifásico segregado, ya que se tienen dos fases dispersas, el aire en forma de burbujas y las microalgas tratadas como partículas sólidas en suspensión. Se escoge modelar el fenómeno en régimen turbulento y teniendo en cuenta el efecto de la gravedad.

### **5.3.1. Características físicas de cada una de las fases**

- *Fase líquida (agua)*

Para definir la fase líquida, se trabaja con el modelo de densidad constante, especificando tanto la densidad ( $997.561 \text{ kg/m}^3$ ), como la viscosidad dinámica ( $8.8871\text{E-}4 \text{ Pa-s}$ ) para el agua. Para la turbulencia por su parte, se escoge el modelo  $\kappa$ - $\epsilon$  standard.

- *Fase gaseosa (aire)*

Para definir la fase gaseosa, al igual que para el agua, se trabaja con el modelo de densidad constante, especificando nuevamente tanto la densidad ( $1.18415 \text{ kg/m}^3$ ), como la viscosidad dinámica ( $1.85508\text{E-}5 \text{ Pa-s}$ ) para el agua. Se especifica las burbujas como esferas con  $0,004 \text{ m}$  de diámetro.

- *Fase sólida (microalgas)*

En la fase sólida se usó el modelo de densidad constante, tomando una densidad cercana a la de la fase líquida ( $1.0 \text{ kg/m}^3$ ). La viscosidad, al estar en presencia de partículas sólidas, carece de significado físico. Las microalgas son tratadas como esferas rígidas con un diámetro de  $1 \times 10^{-5} \text{ m}$ .

De acuerdo con Prochazkova et al. [73], el tamaño de las células para la *Freshwater Chlorella vulgaris*, especie de microalgas sobre la cual se basa la simulación, está típicamente alrededor de  $5\text{-}10 \text{ }\mu\text{m}$ , por lo tanto, el diámetro de  $1 \times 10^{-5} \text{ m}$  escogido para las partículas de microalgas es adecuado.

En la Tabla 6 se resumen las características para cada una de las fases presentes en la simulación del fotobiorreactor.

<i>Propiedades de las fases</i>	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad dinámica (Pa-s)	Diámetro (m)
Agua	997.561	8.8871e-4	N/A
Aire	1.18415	1.85508e-5	0.004
Microalgas	920	1.0E-6	1e-5

Tabla 6. *Propiedades físicas de las fases.*

### 5.3.2. Configuración de las interacciones entre las fases

En este punto se tuvo en cuenta las interacciones generadas entre la fase continua y cada una de las fases dispersas. A continuación se describe la configuración realizada para cada una de estas.

- *Interacción agua-burbujas*

Primero que todo se especificó un tamaño de para las burbujas de 4 mm de diámetro para la interacción entre estas y el agua contenida en el fotobiorreactor. Esto se realiza a través del modelo “constant interaction length scale”. Se especifica el agua como la fase continua y las burbujas como la fase dispersa en el sistema.

La transferencia de cantidad de movimiento para esta interacción, es modelada teniendo en cuenta la fuerza de arrastre, la fuerza de sustentación, la fuerza de masa virtual y la fuerza de dispersión turbulenta. En esta interacción el coeficiente de arrastre es definido a través de la correlación de Schiller-Naumann, el cual es adecuado para sistemas en los que se tienen burbujas dispersas en una fase líquida [64]. Esta correlación es formulada como:

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) & , Re_p \leq 10^3 \\ 0.44 & , Re_p > 10^3 \end{cases} \quad (26)$$

Donde  $Re_p$  representa el número de Reynolds para la fase dispersa.

- *Interacción agua-microalgas*

Al igual que en el caso anterior el agua es especificada como la fase continua y las microalgas como una fase dispersa con un diámetro para estas de  $1 \times 10^{-5}$  m. Entre las fuerzas incluidas en esta interacción, se tuvo en cuenta la fuerza de arrastre y la fuerza de dispersión turbulenta.

En esta interacción el coeficiente de arrastre es calculado a partir del método Syamlal O'Brien disponible en el software. Este método define la transferencia de cantidad de movimiento entre la fase fluida y la fase sólida a partir de la fracción de la fase dispersa, el número de Reynolds y la velocidad terminal [64].

### **5.3.3. Condiciones iniciales**

Las condiciones iniciales requeridas son la presión, junto con la velocidad y la fracción volumétrica para cada fase. Como presión inicial se toma un valor de 101.325 kPa (presión atmosférica).

Las velocidades para todas fases se toman igual a cero, mientras que la fracción volumétrica para el agua será de 0,9998 y de  $2 \times 10^{-4}$  para las microalgas, mientras que para la fase gaseosa se tendrá inicialmente una fracción volumétrica de cero. Estos valores representan una concentración de microalgas de 400.000 células por mililitro de agua, lo cual está acorde con las condiciones de experimentación que se manejan en el fotobiorreactor modelado.

### **5.3.4. Condiciones de frontera**

Para el sistema se estableció una condición de frontera de entrada y una condición de salida en el fotobiorreactor, mientras que las demás secciones del equipo son consideradas como paredes impermeables por las fases.

- *Condición de frontera de entrada*

En esta tipo de frontera se especifica la velocidad de cada fase que ingresa al sistema, así como las fracciones volumétricas para cada una de estas. En este caso

en particular, se indicó que solamente aire es suministrado especificando una fracción volumétrica igual a uno, con una velocidad de 0,0132 m/s, lo cual equivale a un flujo volumétrico de 2 litros por minuto. También se indica que las burbujas presentan un flujo perpendicular a la superficie de entrada, en esta frontera.

- *Condición de frontera de salida*

Para la salida se especifica que todo el aire que entra al dominio es evacuado a través de esta. A su vez se indica que para la fase líquida y para las microalgas, esta frontera se comporta de manera impermeable.

- *Condición de frontera de pared*

Las demás superficies contenidas en la simulación, son consideradas paredes. En este tipo de condición de frontera ninguna de las tres fases puede penetrar dichas zonas, además dichas paredes son especificadas con condición de rugosidad lisa.

La Tabla 7 presenta un resumen de las distintas especificaciones realizadas para cada fase en cada una de las condiciones de frontera anteriormente mencionadas.

CONDICIÓN DE FRONTERA	FASE	ESPECIFICACIÓN	
Entrada	Agua	<b>Vel.</b>	<b>Fracción vol.</b>
		0	0
	Aire	<b>Vel.</b>	<b>Fracción vol.</b>
		0,0132 m/s	1
	Microalgas	<b>Vel.</b>	<b>Fracción vol.</b>
		0	0
Salida	Agua	Impermeable	
	Aire	Flow split outlet	
	Microalgas	Impermeable	

Tabla 7. Resumen de las especificaciones utilizadas para cada fase en las condiciones de frontera del PBR.

## 5.4. INDEPENDENCIA DEL MALLADO

Se busca determinar el tamaño máximo de malla con el cual se pueda garantizar que los resultados obtenidos con la simulación, no se verán afectados al variar el

tamaño de los volúmenes finitos que conforman la malla computacional. En el proceso de independencia del mallado, se desea encontrar una solución en la que la magnitud de las variables del campo de flujo no se vean afectadas significativamente al incrementar la cantidad de nodos presentes en la malla seleccionada. Este estudio fue realizado al comparar los resultados de la simulación obtenidos para distintas resoluciones de malla, manteniendo constantes todas las demás condiciones y parámetros al configurar la simulación. En la Tabla 8 se presenta un resumen de la cantidad de caras y nodos para cada una de las mallas utilizadas, al modificar el tamaño base para cada una de estas. Se puede apreciar los valores para las mallas del sólido original (Malla 3D), para el plano seccionado (Placa 3D) y para la malla en dos dimensiones (Placa 2D).

Malla	Malla 3D		Placa 3D		Placa 2D	
	Caras	Nodos	Caras	Nodos	Caras	Nodos
4 mm	1622198	606294	875256	534029	349528	177963
5 mm	1051608	395217	573092	350954	228653	116883
6 mm	699397	261337	402876	247648	160599	82437
7 mm	597976	218127	302808	186800	120849	62260
8 mm	434176	158579	232658	144059	92810	48019
9 mm	313339	114640	192268	119389	76663	39767

*Tabla 8. Resumen del número de nodos y caras para cada una de las mallas utilizadas.*

A partir de los resultados de la simulación, se obtuvo el valor de la velocidad para cada una de las fases, así como la presión para un punto geométrico específico sobre el dominio, el cual se localiza en el centro de la columna. Por otra parte, se obtuvieron los valores promedios en todo el volumen del PBR de las velocidades de cada una de las fases, así como las fracciones volumétricas de la fase continua y de las microalgas. Se graficó la variación del error para cada una de las variables mencionadas, con respecto al tamaño base de la malla. Esto puede observarse de la Figura 10 a la Figura 13. El error alcanza valores por debajo del 0,5% para las variables analizadas, por lo cual se puede garantizar la independencia del mallado. Los datos en el centro del fotobiorreactor y los valores promedios para las variables, se presentan en la Tabla 9 y en la Tabla 10 respectivamente, mientras que los valores del error relativo en la

Malla	Presión	Vel Agua	Vel Aire	Vel Microalgas
4 mm	101322,8	0,2424938	0,5923409	0,2424967
5 mm	101323,2	0,2414588	0,5919381	0,2414805
6 mm	101324,2	0,2383685	0,5886949	0,2383723
7 mm	101322,9	0,2423399	0,5924544	0,2423428
8 mm	101329,1	0,2397798	0,5897501	0,23905962
9 mm	101321,7	0,2349873	0,5848828	0,2339854

Tabla 9. Comportamiento de algunas variables del sistema con respecto a la resolución de mallado en el centro del PBR.

Malla	Vel. agua	Vel. Aire	Vel. Microalgas	Xagua	Xmicroalgas
4 mm	0,1213186	0,3463714	0,1213218	0,9935188	0,000198651
5 mm	0,1215065	0,346296	0,1215113	0,9935006	0,000199057
6 mm	0,1243312	0,3464714	0,1224132	0,9935101	0,000199048
7 mm	0,1225212	0,3463852	0,1225206	0,9934959	0,000199011
8 mm	0,1227252	0,3461775	0,1243691	0,99366	8,48954x10 <sup>-6</sup>
9 mm	0,1228242	0,3464906	0,1228266	0,00019823	0,1228242

Tabla 10. Comportamiento del promedio en todo el dominio de algunas variables del sistema con respecto a la resolución de mallado.

Malla	%Error Pr	%Error V. Agua	%Error V. Aire	%Error V. Micro
9 mm	NA	NA	NA	NA
8 mm	0,007302937	1,998708815	0,825315672	2,122575113
7 mm	0,006119051	1,056408788	0,456457071	1,354766884
6 mm	0,00128301	1,666075845	0,63861603	1,665671724
5 mm	0,000986941	1,279845671	0,547895126	1,287143268
4 mm	0,000394778	0,426815036	0,068001382	0,419057249

Tabla 11. Comportamiento del error relativo para algunas variables del sistema con respecto a la resolución de mallado en el centro del PBR.

Malla	%Err Vel. agua	%Err Vel. Aire	%Err Vel. Micro.	%Err Xagua	%Err Xmicroalgas
9 mm	NA	NA	NA	NA	NA
8 mm	0,080668029	0,090444931	1,240259839	0,02150635	2234,991885
7 mm	0,166501797	0,059962146	1,50872588	0,016517431	95,73413252
6 mm	0,088552831	0,024879398	0,087735636	0,001429276	0,018688959
5 mm	0,745886023	0,050650311	0,742235496	0,000956215	0,004672022
4 mm	0,154881444	0,021768541	0,156196166	0,001831873	0,204781765

Tabla 12. Comportamiento del error relativo del promedio en todo el dominio de algunas variables del sistema con respecto a la resolución de mallado.



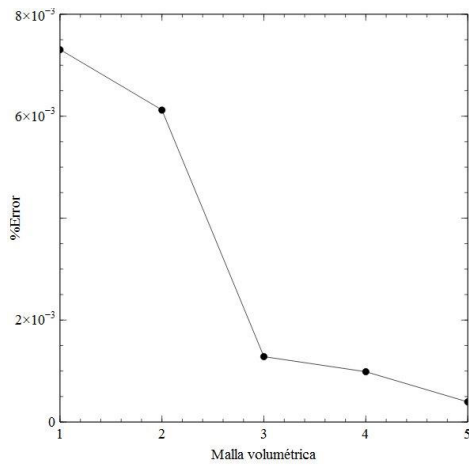


Figura 10. Variación del error para la presión en el punto central del PBR.

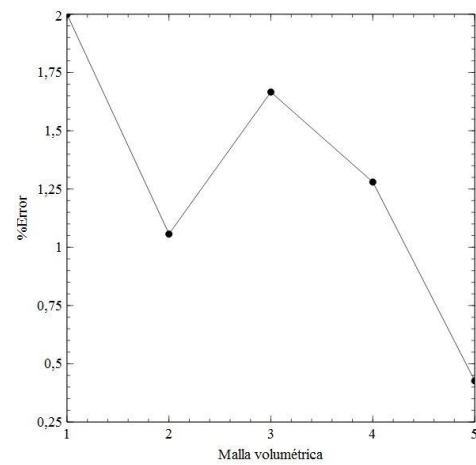


Figura 11. Variación del error para la velocidad del agua en el punto central del PBR.

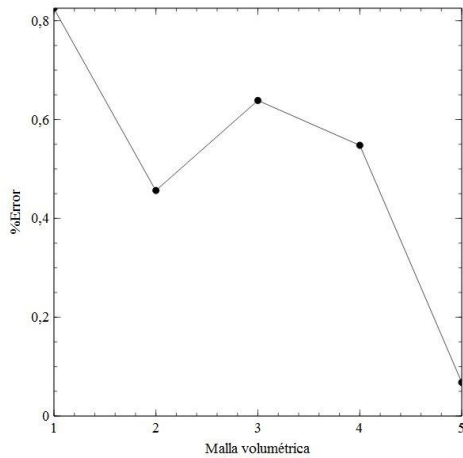


Figura 12. Variación del error para la velocidad del aire en el punto central.

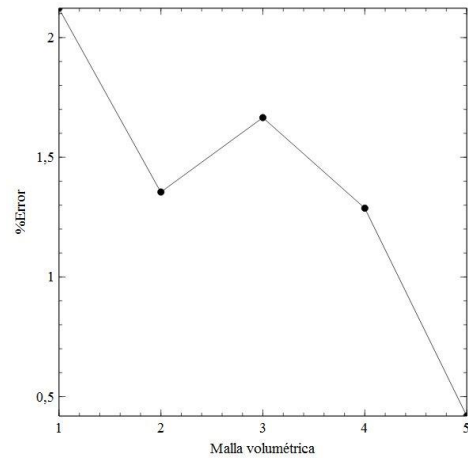
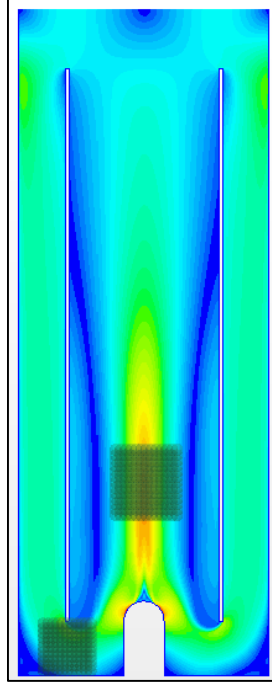


Figura 13. Variación del error para la velocidad de las microalgas en el punto central.

Dado que se observaron zonas con altas tasa de cambio en las variables hidrodinámicas, se realizó un estudio sobre el comportamiento del gradiente de velocidad en dos zonas específicas del fotobiorreactor. Estas zonas pueden visualizarse en los gráficos de contorno de velocidad de la fase líquida Figura 14. Se establecieron así un total de 256 puntos en cada uno de los planos, de donde se obtuvieron los valores para la velocidad del agua. Se estableció el plano ubicado en la parte inferior del fotobiorreactor como la zona 1, mientras que el plano en el riser será la zona 2.



*Figura 14. Ubicación de las zonas en donde se analiza el comportamiento del gradiente de velocidad del agua.*

Una vez obtenidos los valores de la velocidad en los puntos del plano, se procede a realizar el cálculo del gradiente para cada uno de estos haciendo uso de un algoritmo en el software Matlab R2010a para cada una de las mallas mencionadas previamente. Seguidamente se calculó, mediante el mismo software, el valor de la norma infinito de los datos de velocidad. Este valor nos indica la mayor tasa de cambio de la variable estudiada en la región. En este sentido, para una simulación en la que se cumple la independencia de mallado, el error relativo entre los gradientes debe tender a disminuir a medida que se incrementa el número de nodos presentes en el dominio. La Ecuación 27 presenta la fórmula matemática utilizada para este cálculo.

$$\%Error = \left| \frac{\| \nabla v_l \|_{\infty}^k - \| \nabla v_l \|_{\infty}^{k+1}}{\| \nabla v_l \|_{\infty}^{k+1}} \right| \quad (27)$$

Donde  $k$  y  $k+1$  representan las mallas comparadas para calcular el error relativo, siendo la malla  $k+1$  la de mayor resolución. El comportamiento de este error relativo con respecto al logaritmo del número de nodos se presenta en la Figura 15 y en la Figura 16 para las dos zonas seleccionadas. Además, en la Tabla 13 se presentan los valores con los que se generan los gráficos.

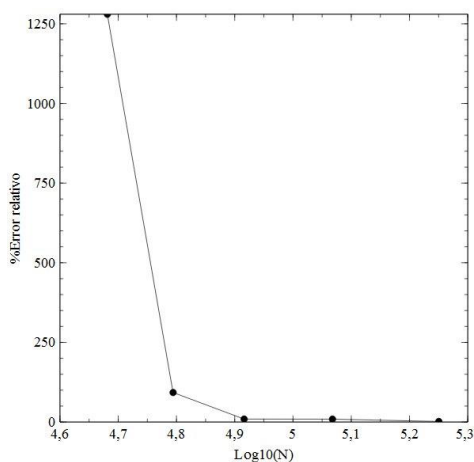


Figura 15. Comportamiento del error relativo para la zona 1 del PBR.

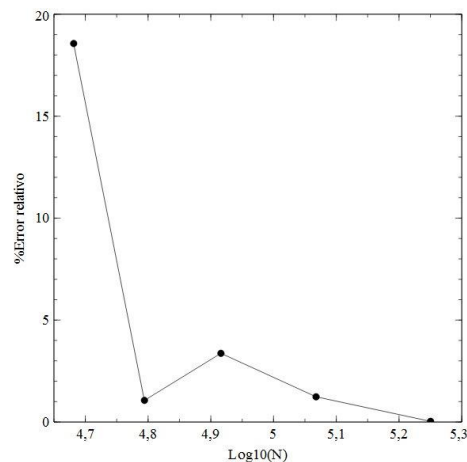


Figura 16. Comportamiento del error relativo para la zona 2 del PBR.

Puede evidenciarse que la tendencia del error relativo es de disminuir a medida que se incrementa el número de nodos en el dominio, lo cual es lo esperado de acuerdo con lo planteado previamente.

ZONA 1		ZONA 2	
Log10(N)	%Error rel.	Log10(N)	%Error rel.
4,68	1279,96	4,68	18,56
4,79	92,58	4,79	1,06
4,92	9,28	4,92	3,37
5,07	9,05	5,07	1,24
5,25	1,65	5,25	0,03

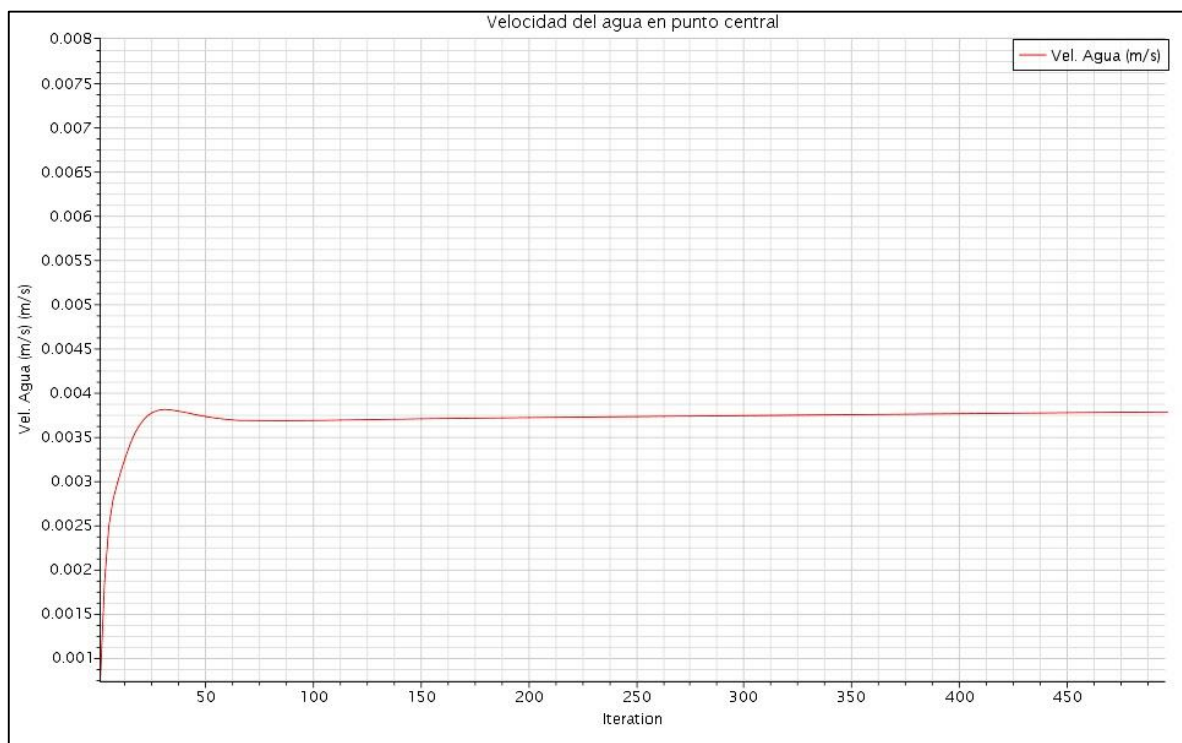
Tabla 13. Datos del comportamiento del error relativo en las dos zonas del PBR.

## 5.5. CONFIGURACIÓN PARA LA SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO

Para desarrollar la simulación de la operación del fotobiorreactor en estado transitorio, se estableció un flujo de entrada de aire de 2 litros por minuto. El paso

de tiempo se fijó en un valor de 0.1 segundos, ya que durante la formación del penacho de burbujas el sistema presenta grandes cambios en sus variables hidrodinámicas en periodos cortos de tiempo.

Cada paso de tiempo consta de 500 iteraciones internas, con las cuales se logra garantizar que las variables hidrodinámicas más importantes, alcanzan un valor estable antes de avanzar al siguiente paso de tiempo. Esto último puede ser visualizado de la Figura 17 a la Figura 19.



*Figura 17. Comportamiento de la velocidad del agua en un paso de tiempo durante las 500 iteraciones.*

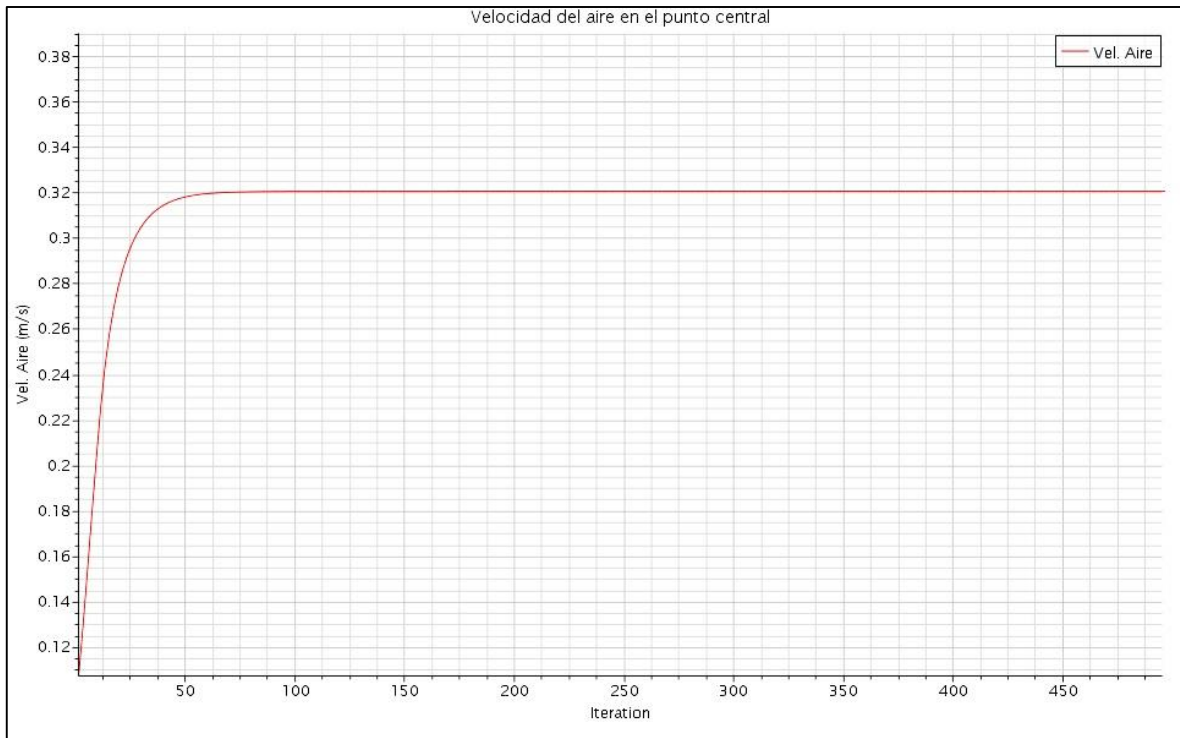


Figura 18. Comportamiento de la velocidad del aire en un paso de tiempo durante las 500 iteraciones.

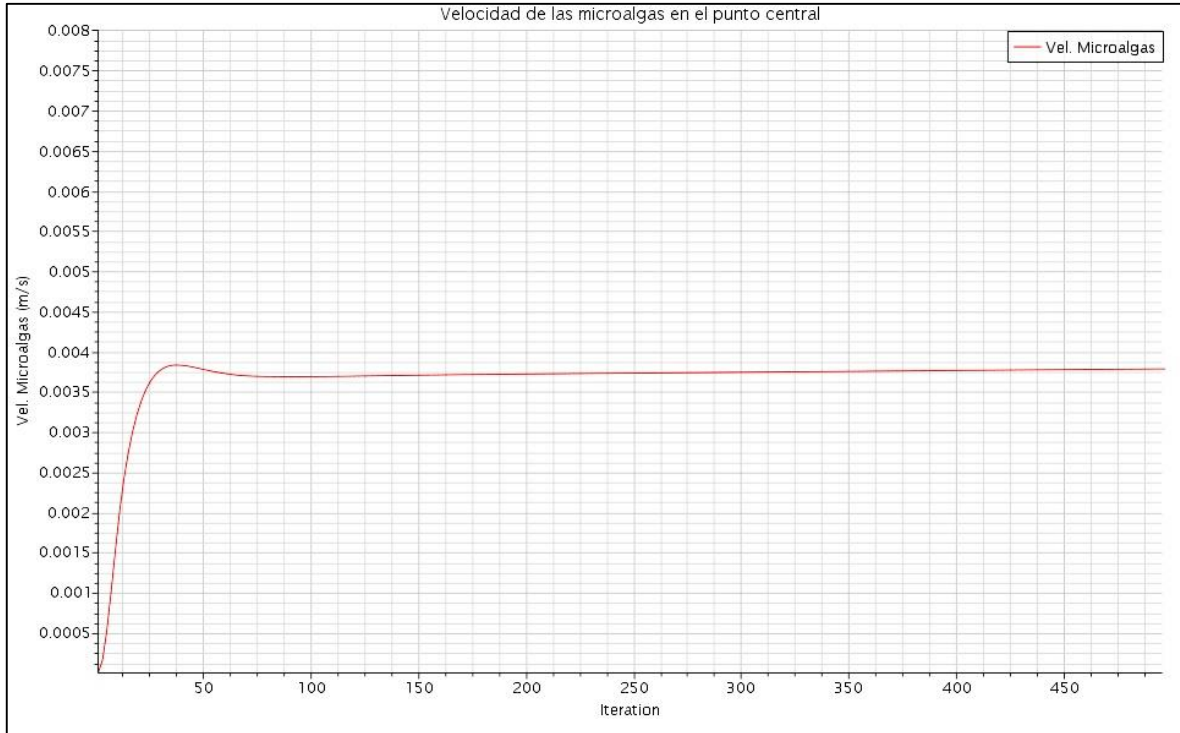
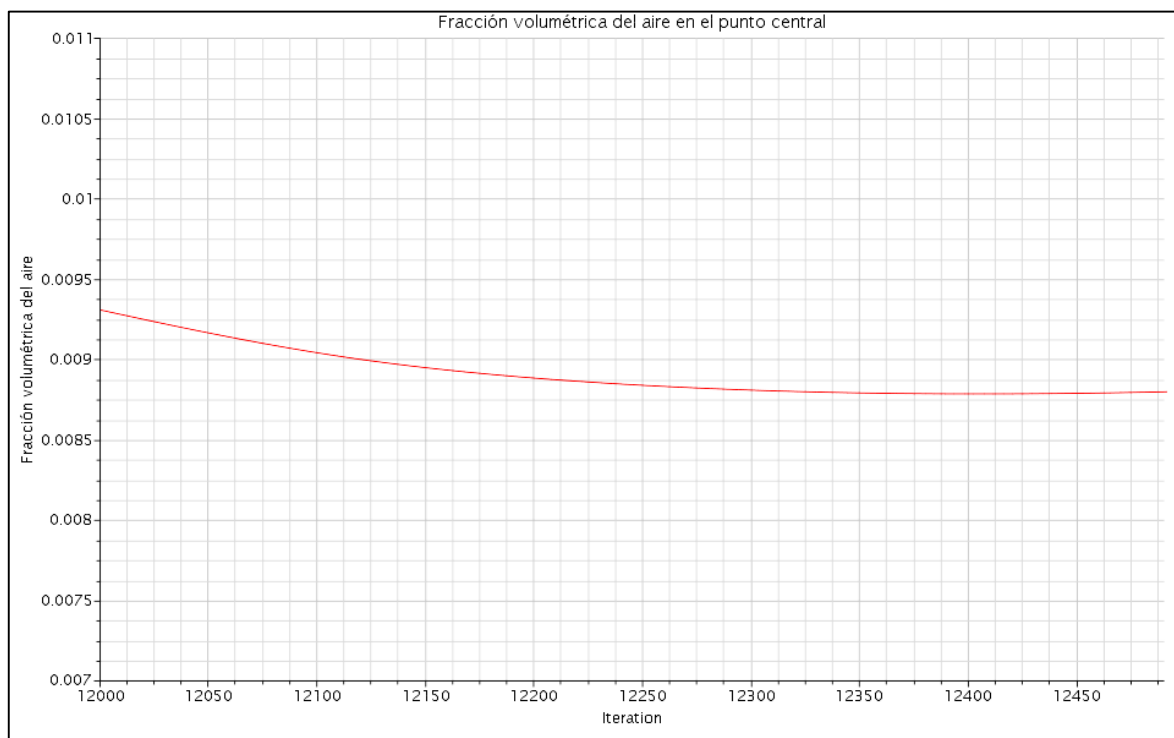


Figura 19. Comportamiento de la velocidad de las microalgas en un paso de tiempo durante las 500 iteraciones.

En la Figura 20 y Figura 21 se presenta el comportamiento de las fracciones volumétricas de la fase gaseosa y de las microalgas. Para estas variables es necesario estudiar su comportamiento en un instante de tiempo más avanzado en la simulación, en el que las burbujas hayan alcanzado el punto central del fotobiorreactor, y por lo tanto, lograr variar los valores de dichas fracciones volumétricas.



*Figura 20. Comportamiento de la fracción volumétrica del aire en un paso de tiempo durante las 500 iteraciones.*

En la Figura 22 se presenta el comportamiento de los residuales para las variables estudiadas para un paso de tiempo definido.

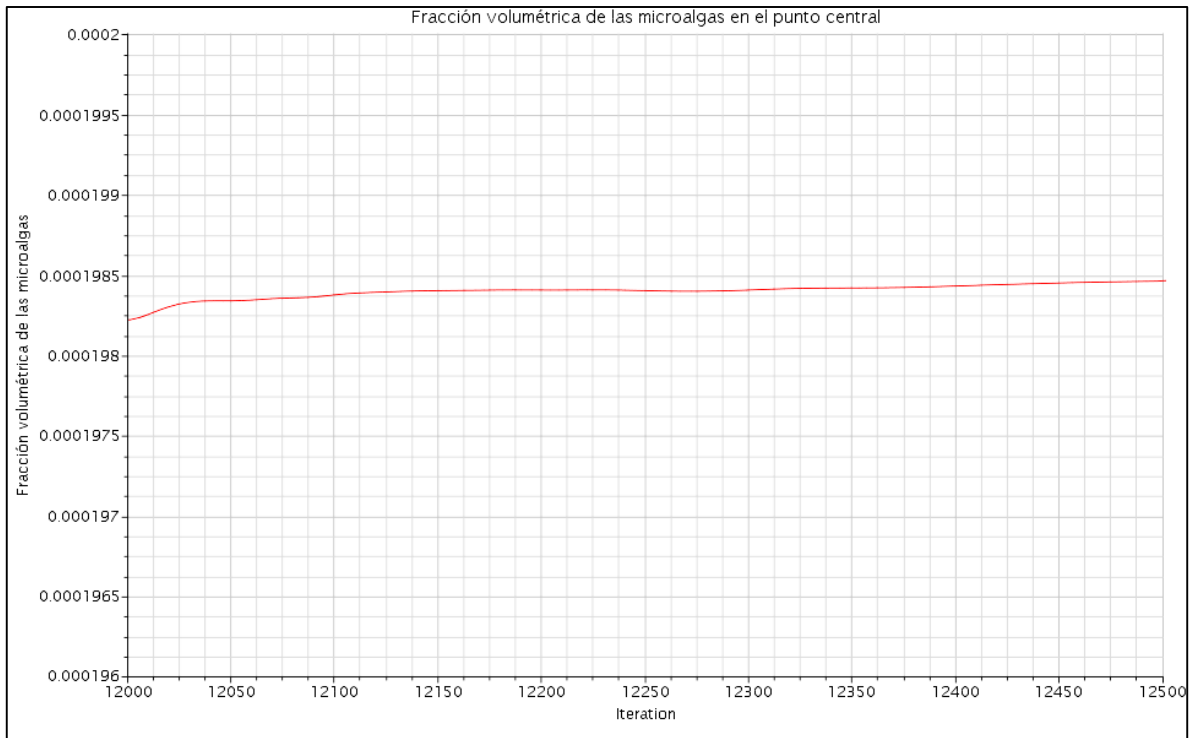


Figura 21. Comportamiento de la fracción volumétrica de las microalgas en un paso de tiempo durante las 500 iteraciones.

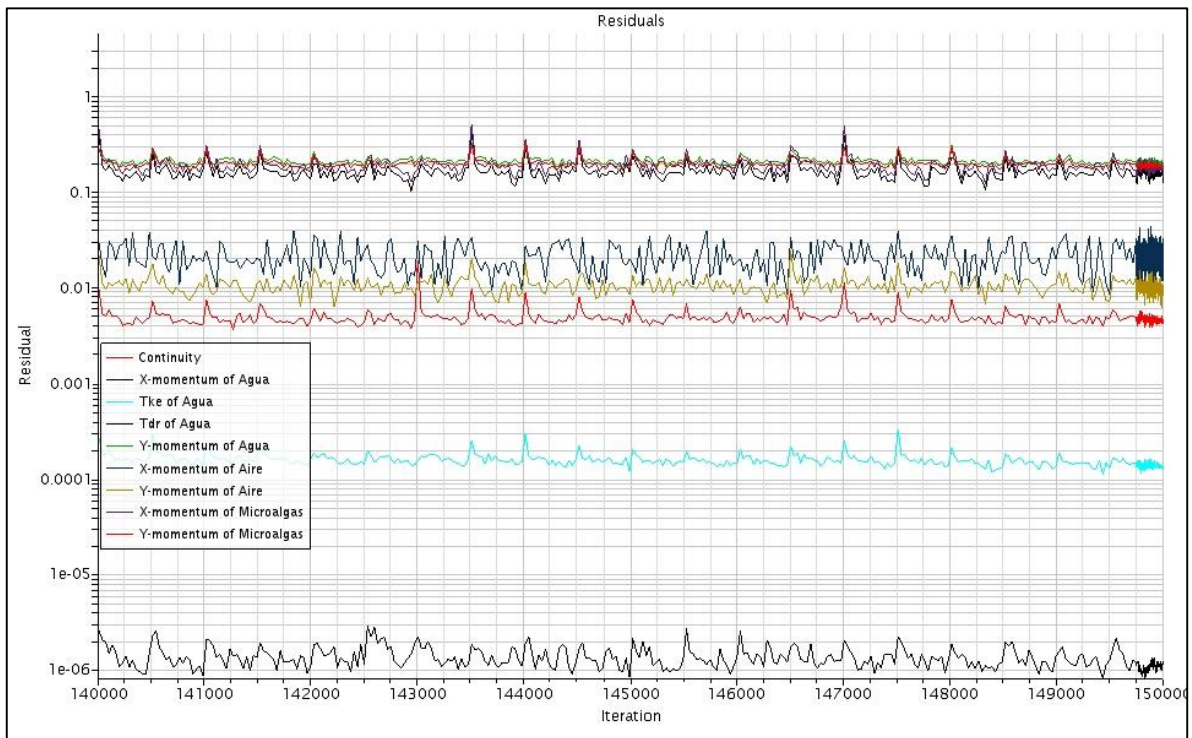


Figura 22. Comportamiento de los residuales en la simulación.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de definir la discretización espacial y la configuración de las condiciones de del dominio computacional, se dio solución al modelado realizado del flujo en tres fases del fotobiorreactor tipo airlift. A continuación se presentarán los resultados alcanzados para la simulación en estado transitorio, luego de transcurridos los 30 segundos de tiempo físico, y la correspondiente validación experimental de los resultados obtenidos.

### 6.1. PERFIL DE VELOCIDAD Y FRACCIÓN VOLUMÉTRICA DEL AIRE

En las figuras que se presentan a continuación se exponen los gráficos de contorno generados para la velocidad de las burbujas y su fracción volumétrica en el fotobiorreactor, proyectados sobre el plano XY. Estos gráficos de contorno permiten la visualización de los valores promediados de las principales variables hidrodinámicas del flujo multifásico en distintas regiones del dominio.

De los contornos de la fracción volumétrica del aire (Figura 23), se puede observar que el valor más alto para esta variable se encuentra en la región cercana a la piedra porosa a través de la cual el aire entra al sistema.

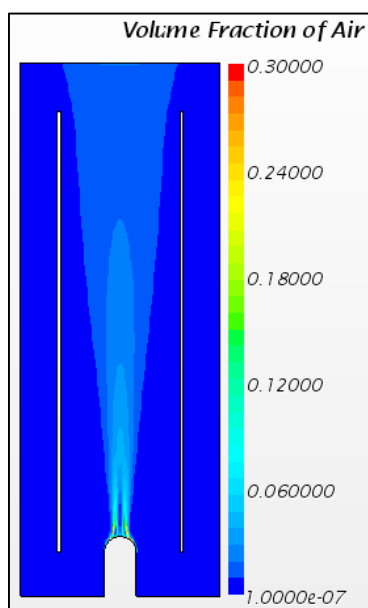


Figura 23. Contornos de fracción volumétrica de aire.



Para determinar este valor numérico, un total de 100.000 puntos fueron ubicados a una distancia de 0.2 mm por encima de la alimentación de las burbujas, formando una línea ortogonal al flujo de aire. Se registraron los valores de fracción volumétrica para esta fase y se obtuvo el promedio de estos, arrojando un valor de 0.143.

Por otra parte al observar el perfil de velocidad en esta fase, se puede evidenciar que los valores más altos corresponden a la zona del riser, en donde el penacho presenta las oscilaciones (Figura 24).

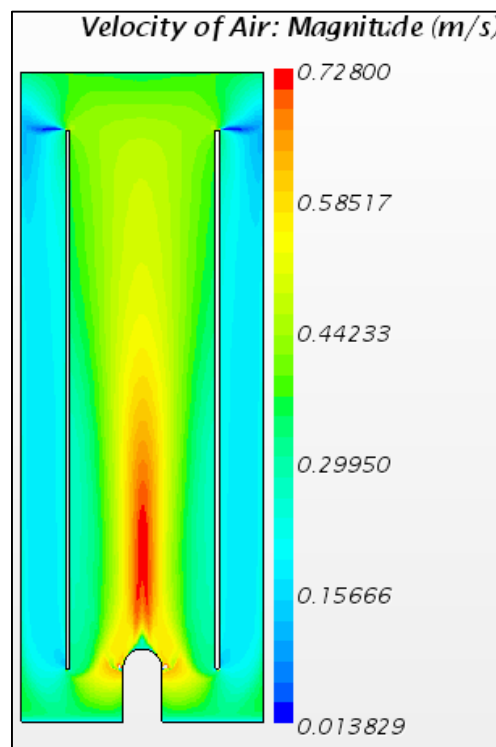


Figura 24. Contornos de velocidad para la fase gaseosa.

## 6.2. PERFIL DE VELOCIDAD PARA EL AGUA

En la Figura 25 se expone el gráfico de contornos de velocidad obtenido a partir de la simulación para la fase líquida. Al igual que en el caso de los contornos de velocidad para la fase gaseosa, los valores más altos para el agua se presentan en la zona de riser, pero con una magnitud menor a la obtenida para el aire. Esta

velocidad de la fase continua es menor al ser esta la inducida al movimiento por el flujo de las burbujas.

Cabe resaltar que el flujo del agua luego de pasar a través de las ventanas, cambia su dirección pero manteniendo una magnitud apreciable, con lo que se garantiza la circulación de esta en el fotobiorreactor.

Esto puede ser corroborado al analizar el gráfico de los vectores de velocidad para esta fase, en los que se logra verificar este comportamiento (Figura 28). Como se puede observar del gráfico, alrededor de la base del equipo encontramos zonas en las que la velocidad del agua es muy baja.

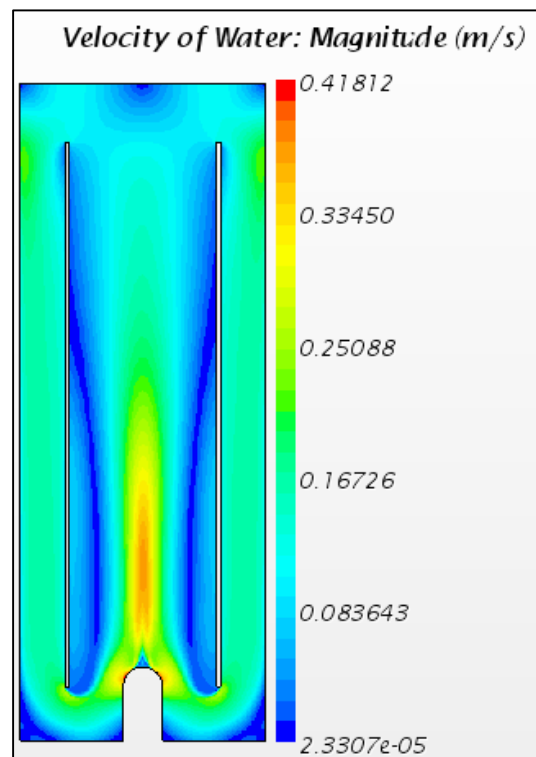


Figura 25. Contornos de velocidad para la fase líquida.

### 6.3. PERFIL DE VELOCIDAD Y FRACCIÓN VOLUMETRICA PARA LAS MICROALGAS

La Figura 26 presenta los resultados obtenidos para los contornos de fracción volumétrica y de velocidad para las microalgas.

A partir de los valores de fracción volumétrica observados en el gráfico se puede apreciar el efecto de mezclado originado por la fase gaseosa, ya que se evidencia la presencia de estos microorganismos en toda la extensión del fotobiorreactor. Sin embargo, estos resultados muestran zonas en las que la presencia de las microalgas es mayor. Esto es una consecuencia de la baja velocidad en el fondo del downcomer, comparado tanto con la velocidad en el riser como en la parte superior del downcomer [74].

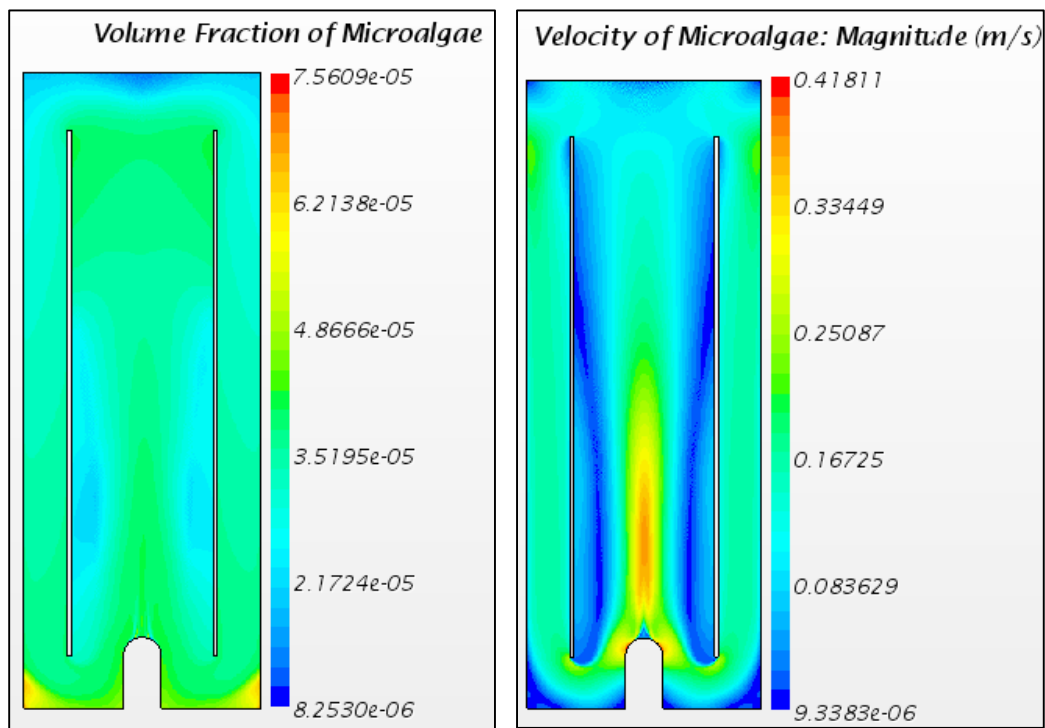


Figura 26. Contornos de fracción volumétrica (izquierda) y velocidad (derecha) para las microalgas.

Al contrastar los contornos de velocidad de las microalgas con aquellos obtenidos para el agua, es evidente que el comportamiento de esta variable es bastante

cercana para ambas fases, por lo que es posible afirmar que las microalgas describen el mismo patrón de flujo que la fase continua. Esto está en concordancia con los resultados experimentales alcanzados por Luo y Al-Dahhan [75].

#### 6.4. VECTORES DE VELOCIDAD PARA EL AGUA, LAS BURBUJAS Y MICROALGAS

La condición de permeabilidad para la fase gaseosa en el tope del fotobiorreactor puede ser verificada con el comportamiento de los vectores de velocidad. En la Figura 27 se puede observar como los vectores de velocidad para el aire salen del sistema como se esperaba debido a la condición de frontera especificada.

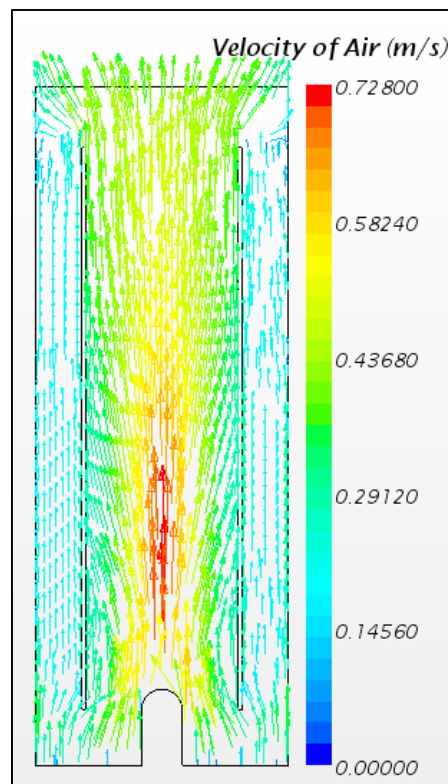


Figura 27. Vectores de velocidad para el aire.

Al usar esta condición de salida todo el flujo de aire entrando al sistema, saldrá del fotobiorreactor completando de esta manera el balance de masa. En la zona del downcomer algunos vectores de velocidad se encuentran presentes. De acuerdo

con los resultados expuestos por García et al. [62], esto indica que cierta cantidad de masa de aire es arrastrada por el flujo de agua.

Los vectores de velocidad para el agua se presentan en la Figura 28. Estos vectores se encuentran de forma organizada, apuntando hacia abajo en la zona del downcomer y hacia arriba en la zona del riser, lo cual es un indicador de que se presenta un buen desempeño para el mezclado a un flujo de alimentación del aire de 2 litros por minuto.

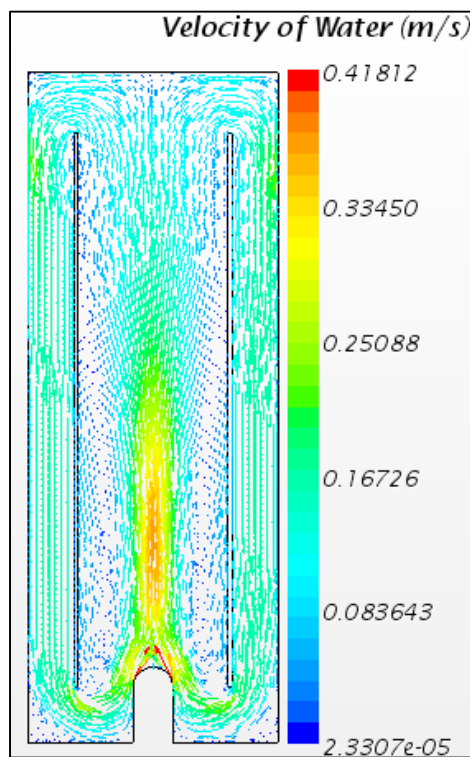


Figura 28. Vectores de velocidad para la fase líquida.

Debido a la recirculación de agua desde el downcomer hacia el riser, zonas de baja presión son generadas. Esto tiene como consecuencia que se presente un efecto de retro mezclado en esa región del fotobiorreactor, como puede observarse en la Figura 29.

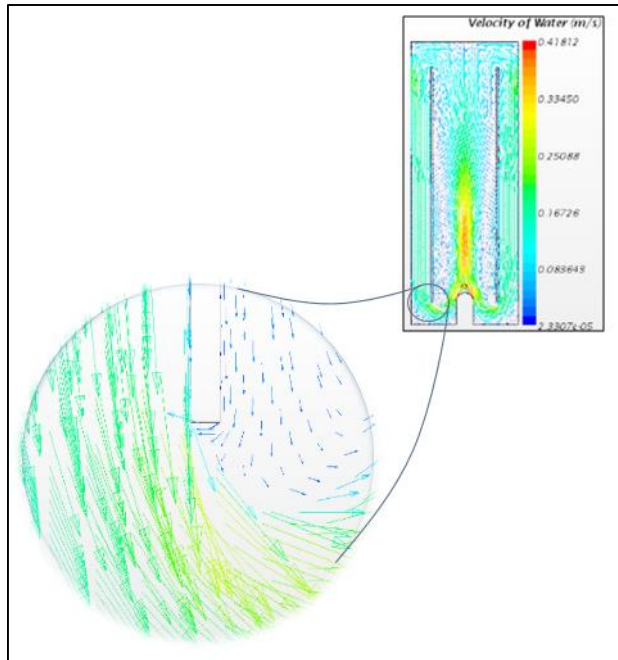


Figura 29. Vectores de velocidad para el agua en el fondo del PBR.

Por su parte, los vectores de velocidad para las microalgas indican que esta fase dispersa sigue el patrón de flujo de la fase continua, llevando a estos microorganismos a tener una circulación constante en el PBR. La Figura 30 presenta los vectores de velocidad para esta fase, los cuales son muy parecidos a los expuestos por el agua.

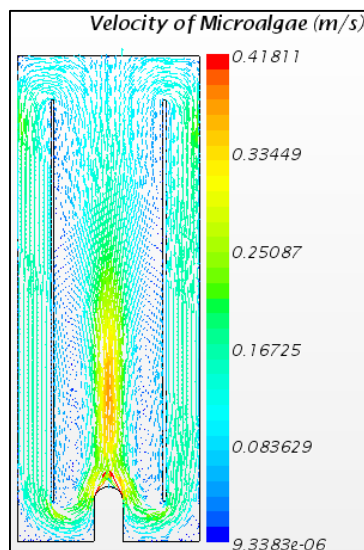


Figura 30. Vectores de velocidad descritos por las microalgas.

## 6.5. ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA Y TASA DE DISIPACIÓN TURBULENTA EN LA FASE CONTINUA

La energía cinética turbulenta y la tasa de disipación turbulenta para la fase líquida son calculadas directamente del modelo de turbulencia (modelo de turbulencia  $\kappa\text{-}\epsilon$  en el caso particular). Los gráficos de contornos para estas dos variables se presentan en la Figura 31.

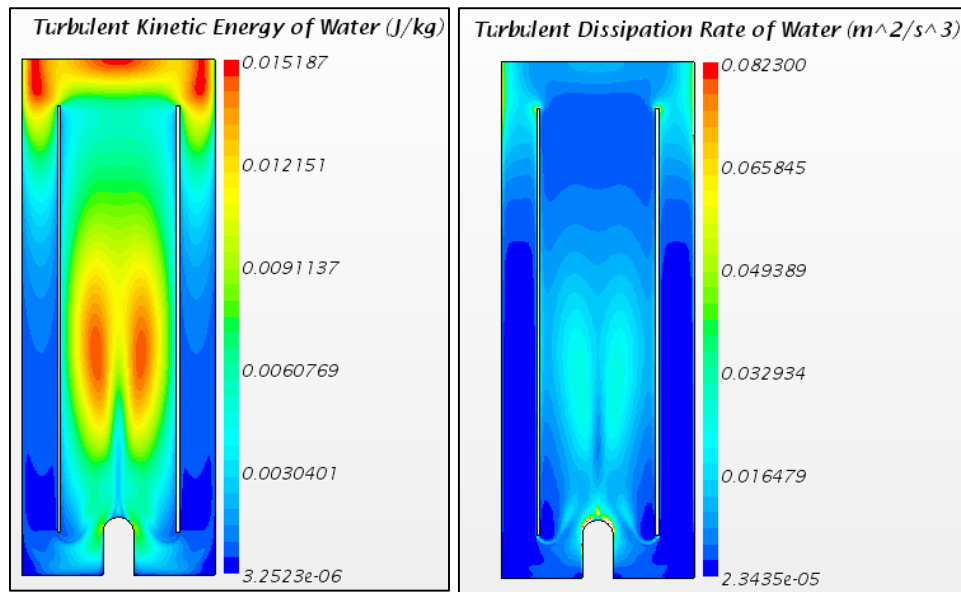


Figura 31. Gráficos de contorno para la energía cinética turbulenta y tasa de disipación turbulenta en el PBR.

Investigaciones como las de Oey et al. [74] y Liu et al. [76], han alcanzado resultados similares a los obtenidos en el presente estudio para la energía cinética turbulenta y la tasa de dispersión turbulenta.

Una comparación entre los contornos de la simulación en flujo bifásico agua-aire [62] y una mezcla en flujo trifásico

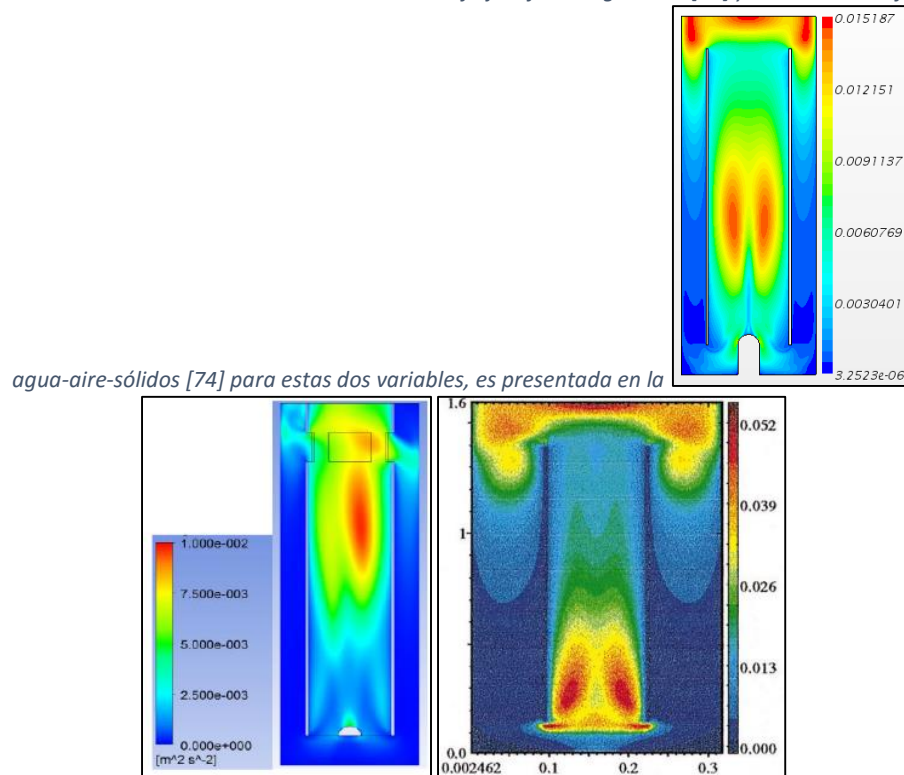


Figura 32. Es posible evidenciar que entre más alta sea la concentración de los sólidos dispersos en este tipo de sistemas, la zona con altos valores de energía cinética turbulenta se localizará en una región más baja en el riser.

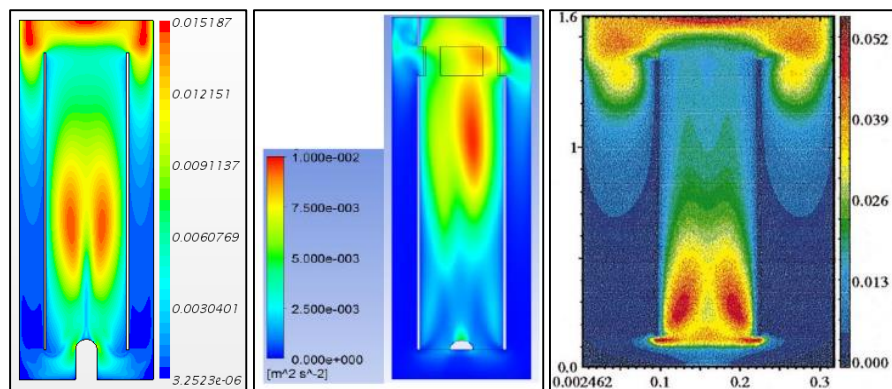


Figura 32. Distribución de la energía cinética turbulenta en la presente investigación (izquierda), García et al. [62] (centro) y Oey et al [74]. (derecha).



Tanto la energía cinética turbulenta como la tasa de dispersión turbulenta tienen sus valores más elevados en el tope y en la sección media del riser, mientras que en el downcomer se observan los valores más bajos, confirmando que las interacciones entre las fases pueden influenciar en la forma en que se distribuyen estas dos variables en el dominio.

En la simulación del flujo bifásico agua-burbujas [62], el valor más alto para la energía cinética turbulenta fue reportado alrededor de  $1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$ , mientras que al realizar una simulación incluyendo una tercera fase en estado sólido, alcanzando una mezcla slurry, Oey et. al [74] encontraron que esta misma variable alcanza su valor máximo alrededor de  $5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Por lo tanto, este incremento en el valor de esta variable puede ser atribuido a la presencia de la fase sólida en la mezcla. En este sentido, es de esperar alcanzar valores entre los mencionados anteriormente para la simulación actual debido a la fase sólida dispersa presente a una baja fracción volumétrica., por lo que el valor predicho de  $1.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$  en esta investigación es congruente con la información expuesta previamente.

## 7. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para la validación experimental se implementó un método de seguimiento de las trayectorias de flujo descritas por un trazador al ser introducido en el fotobiorreactor para determinar la velocidad de la fase continua en el sistema. El colorante utilizado fue el cloruro de metiltioninio, el cual es conocido comercialmente como azul de metileno. El fotobiorreactor fue dividido en secciones de 10 centímetros a partir de la zona de alimentación de las burbujas. Se contabilizó el tiempo que le tomaba al colorante alcanzar las marcas y de esta forma se pudo determinar la velocidad promedio de la fase líquida, la cual a su vez fue comparada con el valor obtenido de la velocidad promedio a partir de los datos arrojados por la simulación en el plano escogido. En la Figura 34 se presenta la secuencia de cuadros con los que realizó el cálculo de la velocidad promedio.



*Figura 33. Montaje para la validación experimental.*

Para este primer tramo también se obtuvieron los datos de la simulación, con los que se encontró un valor promedio de 0,171 m/s para la velocidad del agua, mientras que al colorante le tomó 0,7 segundos desplazarse los 10 cm de la sección del fotobiorreactor lo cual equivale a una velocidad promedio de 0,125 m/s. Estos resultados experimentales son comparables con los de los perfiles de la velocidad del agua mostrados anteriormente. Cabe anotar que la velocidad experimental

supuesta para el agua debe ser mayor a la que lleva el flujo de agua en realidad, debido a que parte del colorante ha alcanzado la zona demarcada en un tiempo menor, sin embargo debido a la resolución de la cámara de video utilizada no es posible observarlo.

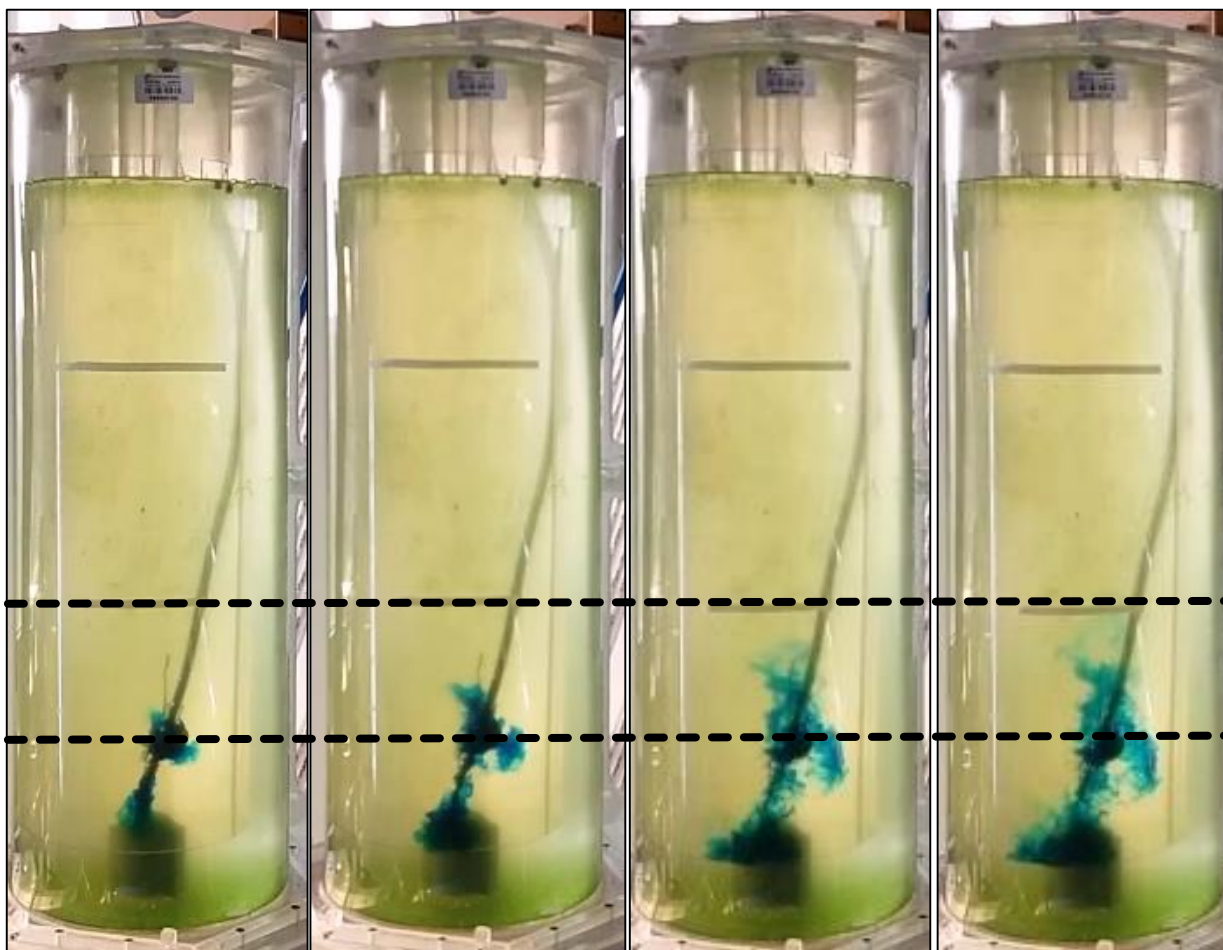
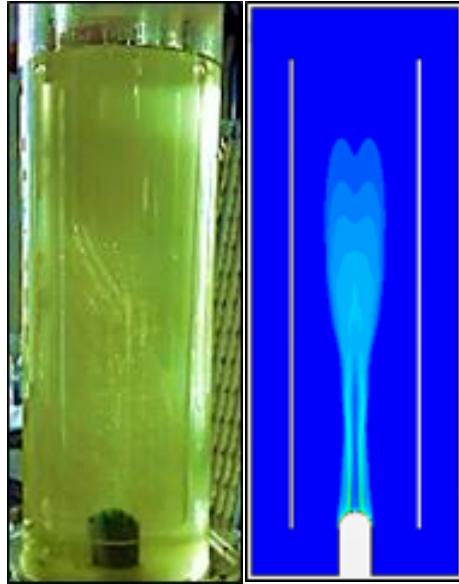


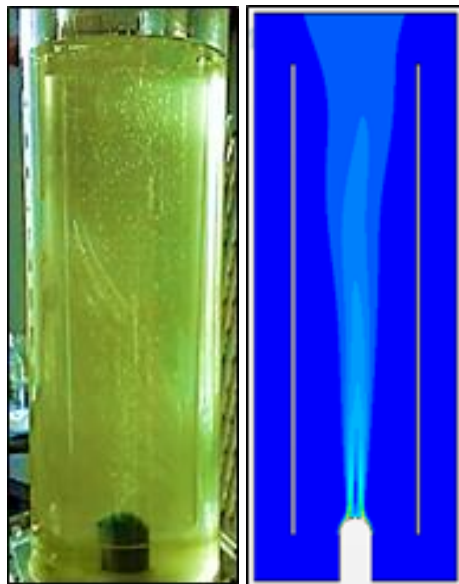
Figura 34. Desplazamiento del azul de metileno en el fotobiorreactor a  $t=0$ ,  $t=0.3$ ,  $t=0.6$  y  $t=0.8$ .

Para reafirmar la validez de los resultados obtenidos computacionalmente, se compara el comportamiento del penacho de aire durante la simulación con la dinámica del flujo multifase en el PBR. Esto se presenta en la Figura 35 y en la Figura 36. Es importante destacar que el CAD utilizado durante la simulación ha sido ajustado para estar al nivel que alcanza el agua en el fotobiorreactor, esto es, cercano al centro de las ventanas de recirculación.



*Figura 35. Resultados para el PBR experimental y la simulación CFD a  $t=1$  seg.*

Para un tiempo de un segundo, las burbujas de aire ya han empezado a elevarse en el PBR, alcanzando aproximadamente el centro del equipo. Luego de siete segundos, como se puede observar en la Figura 36, la fase gaseosa ha alcanzado el tope del riser y el penacho presenta oscilaciones. De acuerdo con esto, los resultados obtenidos en la simulación presentan congruencia con el comportamiento del sistema experimental.



*Figura 36. Resultados para el PBR experimental y la simulación CFD a  $t=7$  seg.*

## 8. CONCLUSIONES

A través de una modelación CFD en dos dimensiones se logró simular el flujo multifásico (agua-burbujas-microalgas) en un fotobiorreactor de elevación neumática tipo airlift bajo un enfoque Euleriano-Euleriano. De acuerdo con los resultados expuestos, el modelo matemático empleado para describir las variables hidrodinámicas lleva a obtener correctas predicciones, al compararlos con el comportamiento experimental.

A partir de los gráficos de contorno de la fracción volumétrica para la fase gaseosa es evidente que la zona del riser tiene una mayor presencia de las burbujas, con una fracción volumétrica baja en la zona del downcomer. Esta característica permite que tanto la fase líquida como las microalgas tengan una recirculación completa al flujo volumétrico de aire especificado en la simulación. Sin embargo, se observa que las células de estos microorganismos exhiben una pequeña acumulación en la parte más baja del downcomer. Esto puede ser una consecuencia de la condición de cuasi-estancamiento encontrada en esta sección del fotobiorreactor, donde las velocidades de la fase continua toma valores bastante bajos. Esto indica que algunas modificaciones podrían realizarse en el diseño del equipo con el fin de mejorar esta condición, ya que en un fotobiorreactor como el simulado se requiere exponer homogéneamente todas las microalgas a la luz y al presentarse estas zonas de muy baja velocidad, es posible no cumplir con este requisito. La evidencia muestra que existe sedimentación de microalgas en esta región durante la operación del fotobiorreactor en el laboratorio.

El comportamiento cinético de las microalgas permite concluir que debido a su tamaño microscópico, estas siguen los vectores de velocidad descrito por la fase líquida, y describen un patrón de flujo similar al presentado por la fase continua. Esto se logra evidenciar al comparar los gráficos de contorno de velocidad para esta

fase dispersa y para el agua, en donde es posible observar que incluso se predicen valores bastante cercanos de esta variable para ambas fases.

La energía cinética turbulenta y la tasa de dispersión turbulenta presentan una distribución similar a lo largo del fotobiorreactor. Ambas variables exhiben sus máximas magnitudes en el tope y en la sección media del riser, lo cual indica que las interacciones entre las fases tienen influencia en la forma en que se distribuyen estas dos variables en el sistema.

## Referencias

- [1] S. Jasvinder y G. Sai, «Commercialization potential of microalgae for biofuels production,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, nº 9, p. 2596–2610, 2010.
- [2] C. Yusuf, «Biodiesel from microalgae,» *Biotechnology Advances*, vol. 25, p. 294–306, 2007.
- [3] R. Davis, A. Andy y P. Pienkos, «Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production,» *Applied Energy*, vol. 88, nº 10, p. 3524–3531, 2011.
- [4] C. Contreras-Florez, J. M. Peña-Castro, L. B. Flores-Cotera y R. O. Cañizares-Villanueva, «Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas,» *Interciencia*, vol. 28, nº 8, pp. 450-456, 2003.
- [5] T. Mata, A. Martins y N. Caetano, «Microalgae for biodiesel production and other applications: A review.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, nº 1, pp. 217-232, 2010.
- [6] C. Ugwu, H. Aoyagi y H. Uchiyama, «Photobioreactors for mass cultivation of algae.,» *Bioresource technology*, pp. 4021-4028, 2008.
- [7] J. Bitog, I. Lee, C. Lee, K. Kim, H. Hwang y S. Hong, «Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production: A review,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 76, nº 2, pp. 131-147, 2011.
- [8] R. Rosello-Sastre, Z. Csögör, I. Perner-Nochta, P. Fleck-Schneider y C. Posten, «Scale-down of microalgae cultivations in tubular photo-bioreactors--a conceptual approach.,» *Journal of Biotechnology*, vol. 132, nº 2, pp. 127-133, 2007.
- [9] L. Ming, H. Dawei y L. Hong, «Photobioreactor with ideal light–dark cycle designed and built from mathematical modeling and CFD simulation.,» *Ecological Engineering*, vol. 73, pp. 162-167, 2014.

- [10] G. Falcone, «Multiphase Flow Metering,» *Developments in Petroleum Science*, vol. 54, pp. 1-18, 2009.
- [11] J. Joshi, «Computational flow modelling and design of bubble column reactors,» *Chemical Engineering Science*, vol. 56, p. 5893–5933, 2001.
- [12] J. O. Wilkes, *Fluid Mechanics for Chemical Engineers*, New Jersey: Prentice Hall PTR, 2006.
- [13] T. Hamzat, A. Norhayati y Y. Ali, «Integration of microalgae biomass in biomethanation systems.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 1610-1622, 2015.
- [14] F. Bux, *Biotechnological Applications of Microalgae: Biodiesel and Value-Added Products*, Londres: Taylor & Francis Group, 2013.
- [15] A. Sebnem y I. Karapinar Kapdan, «Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae,» *ecological engineering*, vol. 28, pp. 64-70, 2006.
- [16] K. Lee y C.-G. Lee, «Effect of light/dark cycles on wastewater Treatments by Microalgae,» *Biotechnol. Bioprocess Eng.*, vol. 6, pp. 194-199, 2001.
- [17] K. Suresh Kumar, H.-U. Dahms, J.-S. Lee y K.-H. Shin, «Microalgae – A promising tool for heavy metal remediation,» *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 113, pp. 329-352, 2015.
- [18] S. Kasiri, A. Ulrich y V. Prasad, «Kinetic modeling and optimization of carbon dioxide fixation using microalgae cultivated in oil-sands process water,» *Chemical Engineering Science*, vol. 137, pp. 697-711, 2015.
- [19] J. Cheng, Y. Huang, J. Feng, J. Sun, J. Zhou y K. Cen, «Improving CO<sub>2</sub> fixation efficiency by optimizing Chlorella PY-ZU1 culture conditions in sequential bioreactors,» *Bioresource Technology*, vol. 144, p. 321–327, 2013.
- [20] A. Catarina Guedes, H. Amaro, C. Barbosa, R. Pereira y F. Xavier Malcata, «Fatty acid composition of several wild microalgae and cyanobacteria, with a focus on eicosapentaenoic, docosahexaenoic and  $\alpha$ -linolenic acids for eventual dietary uses,» *Food Research International*, vol. 44, pp. 2721-2729, 2011.



- [21] J. Li, Y. Liu, J. J. Cheng, M. Mos y M. Daroch, «Biological potential of microalgae in China for biorefinery-based production of biofuels and high value compounds,» *New Biotechnology*, vol. 32, nº 6, pp. 589-595, 2015.
- [22] B. Viswanath, T. Mutanda, S. White y F. Bux, «The microalgae – a future source of biodiesel,» *Dynam Biochem*, vol. 4, nº 1, pp. 37-47, 2010.
- [23] K. Tsukahara y S. Sawayama, «Liquid fuel production using microalgae,» *Journal of the Japan Petroleum Institute*, vol. 48, nº 5, pp. 251-259, 2005.
- [24] R. Singh y S. Sharma, «Development of suitable photobioreactor for algae production – A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 2337-2353, 2012.
- [25] B. D. Fernandes, A. Mota, J. Teixeira y A. Vicente, «Continuous cultivation of photosynthetic microorganisms: Approaches, applications and future trends,» *Biotechnology Advances*, vol. 33, pp. 1228-1245, 2015.
- [26] N.-H. Norsker, M. J. Barbosa, M. H. Vermuë y R. H. Wijffels, «Microalgal production — A close look at the economics,» *Biotechnology Advances*, vol. 1, pp. 24-27, 2011.
- [27] R. Andersen, *Algal Culturing Techniques*, Oxford: Elsevier Inc., 2005.
- [28] C. Contreras Flores, J. M. Peña Castro, L. B. Flores Coterá y R. Cañizares Villanueva, «Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas,» *Interciencia*, vol. 14, pp. 450-456, 2003.
- [29] J. R. Benavente-Valdés, J. Montañez, C. Aguilar, A. Méndez-Zavala y B. Valdivia, «Tecnología de Cultivo de Microalgas en Fotobiorreactores,» *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, vol. 4, nº 7, 2012.
- [30] A. Carvalho, L. Meireles y F. Malcata, «Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances,» *Biotechnol Prog.*, vol. 22, nº 6, pp. 1490-1506, 2006.
- [31] T. Mazzuca-Sobczuk, F. García Camacho, E. Molina Grima y Y. Chisti, «Effects of agitation on the microalgae *Phaeodactylum tricornutum* and *Porphyridium cruentum*,» *Bioprocess Biosyst Eng.*, vol. 28, pp. 243-250, 2006.

- [32] I. Fernández, F. Ación, M. Berenguel, J. Guzmán, G. Andrade y D. Pagano, «A lumped parameter chemical–physical model for tubular photobioreactors,» *Chemical Engineering Science*, vol. 112, pp. 116-129, 2014.
- [33] A. Sánchez Mirón, M.-C. Cerón García, F. García Camacho, E. Molina Grima y Y. Chisti, «Growth and characterization of microalgal biomass produced in bubble column and airlift photobioreactors: studies in fed-batch culture.,» *Enzyme and Microbial Technology*, vol. 31, nº 7, pp. 1015-1023, 2002.
- [34] L. Brennan y P. Owende, «Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, nº 2, pp. 557-577, 2010.
- [35] K. Kaewpintong, A. Shotipruk, S. Powtongsook y P. Pavasant, «Photoautotrophic high-density cultivation of vegetative cells of *Haematococcus pluvialis* in airlift bioreactor.,» *Bioresource Technology*, vol. 98, nº 2, pp. 288-295, 2007.
- [36] S. A. Razzak, M. M. Hossain, R. A. Lucky, A. S. Bassi y H. de Lasa, «Integrated CO<sub>2</sub> capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing—A review.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 622-653, 2013.
- [37] M. Janssen, J. Tramper, L. R. Mur y R. H. Wijffels, «Enclosed outdoor photobioreactors: light regime, photosynthetic efficiency, scale-up, and future prospects.,» *Biotechnol Bioeng.*, vol. 81, nº 2, pp. 193-210, 2003.
- [38] S. Roy, M. Dhotre y J. Joshi, «CFD Simulation of flow and axial dispersion in external loop airlift reactor. Chemical Engineering Research and Design,» *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 84, nº 8, pp. 677-690, 2006.
- [39] S. Sherif, Y. Goswami, E. Stefanakos y A. Steinfeld, *Handbook of Hydrogen Energy*, CRC Press, 2014.
- [40] O. Pulz, «Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms,» *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 57, pp. 287-293, 2001.

- [41] L. Xu, R. Liu, F. Wang y C.-Z. Liu, «Development of a draft-tube airlift bioreactor for *Botryococcus braunii* with an optimized inner structure using computational fluid dynamics.,» *Bioresource Technology*, vol. 119, pp. 300-305, 2012.
- [42] D. Pollard, A. Ison, P. Shamlou y M. Lilly, «Reactor heterogeneity with *saccharopolyspora erythraea* airlift fermentations.,» *Biotechnology and Bioengineering.*, vol. 58, nº 5, pp. 453-463, 1998.
- [43] D. W. Hutmacher y H. Singh, «Computational fluid dynamics for improved bioreactor design and 3D culture.,» *Trends in biotechnology*, vol. 26, nº 4, pp. 166-172, 2008.
- [44] J. Sanyal, S. Vásquez, S. Roy y M. Dudukovic, «Numerical simulation of gas–liquid dynamics in cylindrical bubble column reactors.,» *Chemical Engineering Science*, vol. 54, nº 21, p. 5071–5083, 1999.
- [45] M. Manninen, V. Taivassalo y S. Kallio, On the Mixture Model for Multiphase Flow, Finland: VTT Publications, 1996.
- [46] V. Michele y D. C. Hempel, «Liquid flow and phase holdup—measurement and CFD modeling for two-and three-phase bubble columns.,» *Chemical Engineering Science*, vol. 57, nº 11, p. 1899–1908, 2002.
- [47] K. Ekambara, M. T. Dhotre y J. B. Joshi, «CFD simulations of bubble column reactors: 1D, 2D and 3D approach.,» *Chemical Engineering Science*, vol. 60, nº 23, p. 6733–6746, 2005.
- [48] J. Gimbut, «Assessment of the turbulence models for modelling of bubble column.,» *The Institution of Engineers*, vol. 70, nº 4, pp. 57-64, 2009.
- [49] S. Mortuza, A. Kommareddy, S. P. Gent y G. Anderson, «Computational and experimental investigation of bubble circulation patterns within a column photobioreactor.,» de *ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability*, Washington, DC, 2011.
- [50] R. Mudde y H. E. A. Van Den Akker, «2D and 3D simulations of an internal airlift loop reactor on the basis of a two-fluid model.,» *Chemical Engineering Science*, vol. 56, nº 21-22, p. 6351–6358, 2001.

- [51] M. Blažej, G. Cartland Glover, S. Generalis y J. Markoš, «Gas–liquid simulation of an airlift bubble column reactor.,» *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 43, nº 2, pp. 137-144, 2004.
- [52] S. Talvy, A. Cockx y A. Line, «Global modelling of a gas–liquid–solid airlift reactor,» *Chemical Engineering Science*, vol. 60, nº 22, pp. 5991-6003, 2005.
- [53] H.-P. Luo y M. H. Al-Dahhan, «Verification and validation of CFD simulations for local flow dynamics in a draft tube airlift bioreactor,» *Chemical Engineering Science*, vol. 66, nº 5, pp. 907-923, 2011.
- [54] P. Lestinsky, P. Vayrynen, M. Vecer y K. Wichterle, «Hydrodynamics of airlift reactor with internal circulation loop: Experiment vs. CFD simulation,» *Procedia Engineering*, vol. 42, pp. 892-907, 2012.
- [55] Z. Su, R. Kang, S. Shi y W. Cong, «Study on the destabilization mixing in the flat plate photobioreactor by means of CFD,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 34, nº 12, pp. 1879-1884, 2010.
- [56] L.-l. Wang, Y. Tao y X.-z. Mao, «A novel flat plate algal bioreactor with horizontal baffles: Structural optimization and cultivation performance,» *Bioresource Technology*, vol. 164, pp. 20-27, 2014.
- [57] J. Huang, Y. Li, M. Wan, Y. Yan, F. Feng, X. Qu, J. Wang, G. Shen, W. Li, J. Fan y W. Wang, «Novel flat-plate photobioreactors for microalgae cultivation with special mixers to promote mixing along the light gradient,» *Bioresource Technology*, vol. 159, pp. 8-16, 2014.
- [58] A. Faghri y Y. Zhang, *Transport Phenomena in Multiphase Systems*, Oxford: Elsevier, 2006.
- [59] D. Zhang, N. Deen y J. Kuipers, «Numerical simulation of the dynamic flow behavior in a bubble column: A study of closures for turbulence and interface forces,» *Chemical Engineering Science*, vol. 61, nº 23, p. 7593–7608, 2006.
- [60] N. Padoin, A. T. Dal'Toé, L. P. Rangel, K. Ropelato y C. Soares, «Heat and mass transfer modeling for multicomponent multiphase flow with CFD,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 73, pp. 239-249, 2014.

- [61] R. Woolley, F. Fairweather, C. Wareing, C. Proust, J. Hebrard, D. Jamois, V. Narasimhamurthy, I. Storvik, T. Skjold, S. Falle, S. Brown, H. Mahgerefteh, S. Martynov, S. Gant, D. Tsangaris, I. Economou, G. Boulougouris y N. Diamantonis, «An integrated, multi-scale modelling approach for the simulation of multiphase dispersion from accidental CO<sub>2</sub> pipeline releases in realistic terrain,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 27, pp. 221-238, 2014.
- [62] S. García, E. Paternina, O. Pupo, L. Di Mare y A. Bula, «CFD simulation of multiphase flow in an airlift column photobioreactor,» *Global Nest*, vol. 16, nº 6, pp. 1121-1134, 2014.
- [63] X. Wang, X. Jia y J. Wen, «Transient CFD modeling of toluene waste gas biodegradation in a gas–liquid–solid three-phase airlift loop reactor by immobilized *Pseudomonas putida*,» *Chemical Engineering Journal*, vol. 172, nº 2-3, pp. 735-745, 2011.
- [64] CD-adapco, STAR CCM+ User guide version 9.06.009, 2014.
- [65] A. Tomiyama, I. Kataoka, I. Zun y T. Sakaguchi, «Drag Coefficients of Single Bubbles under Normal and Micro Gravity Conditions,» *JSME International Journal Series B*, vol. 41, nº 2, pp. 472-479, 1998.
- [66] S. Lain Beatove, Modelado y simulación de flujos inducidos por burbujas., Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2007.
- [67] I.-h. Seo, I. Lee, H.-S. Hwang, S.-W. Hong, J. P. P. Bitog y K.-S. Kwon, «Numerical investigation of a bubble-column photo-bioreactor design for biodiesel production from microalgae,» de *Conference: XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR)*, Quebec, 2010.
- [68] M. Simmonet, C. Gentric, E. Olmos y N. Midoux, «CFD simulation of the flow field in a bubble column reactor: importance of the drag force formulation to describe regime transitions,» *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 47, nº 9-10, pp. 1726-1737, 2008.

- [69] F. Trujillo, T. Safinski y A. Adesina, «CFD analysis of the radiation distribution in a new immobilized catalyst bubble column externally illuminated photoreactor,» *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 129, pp. 27-35, 2007.
- [70] A. Akhtar, V. Pareek y M. O. Tadé, «CFD simulations for continuous flow of bubble through gas–liquid columns: application of VOF method,» *Chemical Product and Process Modeling*, vol. 1, pp. 1-19, 2007.
- [71] W. Jones y B. Launder, «he Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence,» *Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, pp. 301-314, 1972.
- [72] J. Blazek, «Principles of Grid Generation,» de *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*, Oxford, Elsevier Science Ltd, 2001, p. 440.
- [73] G. Prochazkova, P. Kastanek y T. Branyik, «Harvesting freshwater Chlorella vulgaris with flocculant derived from spent brewer's yeast,» *Bioresource Technology*, vol. 177, pp. 28-33, 2015.
- [74] R. Oey, R. Mudde, L. Portela y H. van den Akker, «Simulation of a slurry airlift using a two-fluid model,» *Chemical Engineering Science*, vol. 56, nº 2, p. 673–681, 2001.
- [75] H.-P. Luo y M. H. Al-Dahhan, «Local characteristics of hydrodynamics in draft tube airlift bioreactor.,» *Chemical Engineering Science*, vol. 63, pp. 3057-3068, 2008.
- [76] R. Liu, Y. Liu y C.-Z. Liu, «Development of an efficient CFD-simulation method to optimize the structure parameters of an airlift sonobioreactor,» *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 91, pp. 211-220, 2013.